

修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 基盤理工学専攻 博士前期課程		
氏 名	林 道明	学籍番号	1933106
論 文 題 目	空間光変調器を用いて生成した非点収差を持つラゲールガウスビームの改良		

要 旨

1. はじめに

本研究の目的は空間光変調(spatial light modulator ; SLM)を用いて非点収差を持つラゲールガウス(LG)ビームを発生させ、位相特異点の反転の制御を行うことである。先行研究[1]において、回折シア干渉計を用いて光ビーム断面内の軌道角運動量密度分布を測定できることが示された。非点収差を持つ LG ビームは光渦の反転を伴う複雑な軌道角運動量密度分布を持ち、測定対象として適している。卒業研究では Arrizón らの方式[2]により計算機ホログラム(CGH)を作成し、非点収差の導入を検討した。本研究では実際に非点収差の導入を行う。非点収差の導入を CGH で行うことにより、カメラを動かさずに反転の前後を観察することが可能となる。

2. 実験

ビームに非点収差を加える手段として円筒面レンズと CGH をそれぞれ単独で用いる方法と併用する方法を実行した。円筒面レンズは SLM 液晶部の縮小像ができる位置に設置する(図 1)。光渦の反転は非点収差による集光位置で起きるので、その前後の強度分布を観察した。円筒面レンズのみの場合はカメラを移動させる必要があるが、CGH のみもしくは併用の場合はカメラを固定したまま集光位置を前後させて観察を行った。

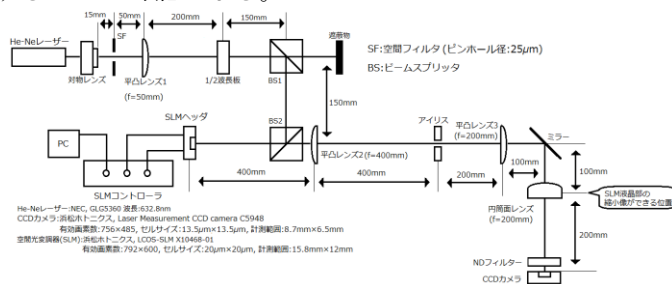


図 1. 円筒面レンズを用いたときの光学系

3. 結果

円筒面レンズと CGH をそれぞれ単独で用いる方法では LG ビームの特徴である中心に穴のある強度分布と設計通りの位置での集光を確認した。併用する方法では設計値から集光位置のずれが生じた。いずれの場合も、生成したビーム断面内に想定外の強度変調が観察された。

4. まとめ

SLM を用いて非点収差を持つ LG ビームを発生させ、集光位置前後の強度分布の観察を行った。円筒面レンズと CGH を併用した場合について集光位置のずれを解消すること、生成したビーム断面内の想定外の強度変調の除去が必要である。

参考文献

- [1] 伊波 雅生, 「光ビームの軌道角運動量密度分布の測定」 電気通信大学修士論文, (2020).
- [2] A. Arrizón, et al., J. Opt. Soc. Am. A **24**, 3500 (2007).

令和2年度修士論文

空間光変調器を用いて生成した
非点収差を持つラゲールガウスビームの改良

電気通信大学 情報理工学研究科
基盤理工学専攻 物理工学プログラム

1933106 林 道明

主任指導教員 宮本 洋子 教授

指導教員 渡邊 恵理子 準教授

提出日 令和3年1月25日

目次

第 1 章	序論	3
第 2 章	原理	4
2.1	ラゲールガウスビーム	4
2.2	ホログラム	5
2.3	ホログラムの変調形式	5
2.4	非点収差	7
第 3 章	実験機器と設定条件	8
3.1	空間光変調器	8
3.2	使用する PC の仕様および画面設定	8
第 4 章	SLM の動作確認実験	10
4.1	実験方法	10
4.2	実験結果	13
第 5 章	SLM の表示倍率測定実験	15
5.1	実験方法	15
5.2	実験結果	19
第 6 章	位相特異点を持たない CGH を用いた実験	23
6.1	実験方法	23
6.2	実験結果	23
第 7 章	LG ビームの生成実験	26
7.1	位相特異点を持つ Type 1 形式の CGH を用いた実験	26
7.1.1	実験方法	26
7.1.2	実験結果	28
7.2	位相特異点を持つ Type 3 形式の CGH を用いた実験	30
7.2.1	実験方法	30
7.2.2	実験結果	31

第 8 章	非点収差を持つ LG ビームの生成実験	34
8.1	円筒面レンズを用いた非点収差を持つ LG ビームの生成実験	34
8.1.1	実験方法	34
8.1.2	実験結果	35
8.2	CGH を用いた非点収差を持つ LG ビームの生成実験	39
8.2.1	実験方法	39
8.2.2	実験結果	41
8.3	円筒面レンズと CGH を併用した非点収差を持つ LG ビームの生成実験	44
8.3.1	実験方法	44
8.3.2	実験結果	44
第 9 章	結論	46
	参考文献	47
	謝辞	49

第1章 序論

本研究では、空間光変調器 (spatial light modulator ; SLM) を用いて非点収差を持つラゲールガウス (LG) ビームを発生させ、位相特異点の反転の制御を行うことを目的とする。LG ビームはドーナツ状の強度分布と中心に特異点のある位相分布を持つ光ビームである。非点収差を持つ LG ビームが水平もしくは鉛直の一方向のビームウェストを通過するとき、その位置の近傍で位相特異点の反転現象が生じる。非点収差の曲率半径を調節することで反転位置を観察位置の前後の任意の位置に設定することができる。

先行研究 [1] において、回転シア干渉計を用いたビームの軌道角運動量の測定方法が実験を通して明らかになった。非点収差を持つビームは複雑な軌道角運動量密度分布を持つため、測定対象として適している。ビームの生成に SLM を用いることで、本来特徴の異なるビームを生成する際に必要な光学系の操作を最小限に留めることができる。

ビームの生成には、ソフトウェア MATLAB を用いて作成した計算機ホログラム (Computer Generated Hologram ; CGH) を用いる。CGH の設計を変更することで、純粋な LG ビームとは異なるビームを発生させることができる。

本論文は全 9 章で構成されている。第 2 章では本研究で用いた原理について述べる。第 3 章では本研究で使った SLM の仕様と詳しい設定条件について述べる。第 4 章、第 5 章では後の実験の準備段階として、SLM の動作確認実験および CGH を使用する際に関係する SLM への表示倍率の測定実験について述べる。第 6 章では位相特異点を持たない CGH を用いた実験について述べる。第 7 章では位相特異点を持つ CGH を用いて LG ビームを生成する実験について述べる。第 8 章では非点収差を持つ LG ビームを生成する実験について述べる。第 9 章はまとめである。

第2章 原理

2.1 ラゲールガウスビーム

この節ではラゲールガウスビームの導出方法について示す。単色光の空間的な伝搬特性は、次に示すヘルムホルツ方程式で表される。

$$(\nabla^2 + k^2)E = 0 \quad (2.1)$$

ここで k は光の波数、 E は電場の複素振幅である。波数 k は波長 λ を用いて $k = 2\pi/\lambda$ と定義される。ここで電場 E を $E = u \exp(ikz)$ と置き、近軸近似を適用すると次の式を得る。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + 2ik \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

ガウスビームはこの方程式の解の一つで、(2.3) 式で表される。

$$\text{FG}(x, y, z) = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp \left\{ -\rho^2 \left(\frac{1}{w^2} - \frac{ik}{2R} \right) - i\psi \right\} \quad (2.3)$$

ここで、 w はビームの振幅が光軸上の振幅に対して $1/e$ になる距離であり、ビーム径を意味する。また、 $\rho = x^2 + y^2$ 、 R は波面の曲率半径、 ψ は光軸上の位相と平面波との位相差である Gouy 位相を表す。 w, R, ψ は伝搬距離 z によって変化する値である。最小ビーム径 w_0 、波数 k 、ビーム径が最小となる位置 z_0 で決定し、以下のように表される。

$$w(z)^2 = w_0^2 \left\{ 1 + \left(\frac{2(z - z_0)}{kw_0^2} \right)^2 \right\} \quad (2.4)$$

$$R(z) = (z - z_0) \left\{ 1 + \left(\frac{kw_0^2}{2(z - z_0)} \right)^2 \right\} \quad (2.5)$$

$$\psi(z) = \tan^{-1} \left(\frac{2(z - z_0)}{kw_0^2} \right) \quad (2.6)$$

$$(2.7)$$

ラゲールガウスビームは (2.2) 式の高次の解であり、円筒座標系 (ρ, φ, z) を用いて (2.8) 式で表される。

$$\begin{aligned} \text{LG}_p^m(x, y, z) &= \sqrt{\frac{2p!}{\pi(|m| + p)!}} \frac{1}{w} \left(\frac{\sqrt{2}\rho}{w} \right)^{|m|} \\ &\times L_p^{|m|} \left(\frac{2\rho^2}{w^2} \right) \exp \left(-\rho^2 \left(\frac{1}{w^2} - \frac{ik}{2R} \right) + im\phi - i\psi_p^m \right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned}
\psi_p^m(z) &= (2p + |m| + 1)\psi(z) \\
&= (2p + |m| + 1)\arctan\left(\frac{2(z - z_0)}{kw_0^2}\right)
\end{aligned} \tag{2.9}$$

m は方位角モード指数、 p は動径方向モード指数を示す。ここで $L_p^{|m|}(x)$ はラゲール陪多項式であり、以下のように表される。

$$\begin{aligned}
L_p^m(x) &= \frac{e^x x^{-m}}{p!} \cdot \frac{d^p}{dx^p}(e^{-x} x^{p+m}) \\
&= \sum_{s=0}^p \binom{p+m}{p-s} \frac{(-x)^s}{s!}
\end{aligned} \tag{2.10}$$

(2.10) 式の $p = 0, 1, 2$ の例を (2.11) 式に示す。

$$\begin{aligned}
L_0^m(x) &= 1 \\
L_1^m(x) &= m + 1 - x \\
L_2^m(x) &= \frac{1}{2}(m+1)(m+2) - (m+2)x + \frac{1}{2}x^2
\end{aligned} \tag{2.11}$$

2.2 ホログラム

通常、ホログラムとは物体から散乱した光 (物体光) と物体以外からの光 (参照光) を干渉させて得られる干渉縞の強度分布を記録したものを指す。干渉縞の強度分布を記録することで物体光の位相と振幅の情報が記録され、元の参照光をホログラムに入射することによって物体光が再生される。

本研究で使用する CGH は、入射ビームに適用する位相変調を計算によって求めたもので、ソフトウェア MATLAB を用いて作成した。SLM を外部ディスプレイとして PC に接続し、位相変調値を画面に表示する輝度値の分布として入力することで、液晶に印加される電圧が変化し、位相変調が実現される。

2.3 ホログラムの変調形式

この節では、参考文献 [2] で述べられている位相変調のみを行う素子を用いて任意の複素振幅分布を得るための符号化条件について示す。また、2 種類の方式により LG ビームの振幅分布と位相分布を実現するホログラムについて示す。目的とする複素振幅分布は、振幅 $a(x, y)$ および位相 $\phi(x, y)$ を用いて

$$s(x, y) = a(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \tag{2.12}$$

と表せる。これを実現する CGH による位相変調を $\psi(\phi, a)$ とする。CGH の振幅透過率は

$$h(x, y) = \exp[i\psi(\phi, a)] \tag{2.13}$$

である。 $h(x, y)$ を ϕ についてフーリエ級数展開したものを

$$h(x, y) = \sum_{q=-\infty}^{\infty} h_q(x, y) \quad (2.14)$$

とする。ここで

$$h_q(x, y) = c_q^a \exp(iq\phi) \quad (2.15)$$

$$c_q^a = (2\pi)^{-1} \int_{-\pi}^{\pi} \exp[i\psi(\phi, a)] \exp(-iq\phi) d\phi \quad (2.16)$$

である。ここで $q = 1$ のとき

$$c_1^a = Aa \quad (2.17)$$

とすると、 $q = 1$ の成分が目的の複素振幅分布となる。これを符号化条件と呼ぶ。(2.17) 式を満たすための必要十分条件は (2.16) 式から

$$\int_{-\pi}^{\pi} \sin(\psi(\phi, a) - \phi) d\phi = 0 \quad (2.18)$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} \cos(\psi(\phi, a) - \phi) d\phi = 2\pi Aa \quad (2.19)$$

となることが分かる。(2.18),(2.19) 式は位相 CGH を決定するための条件となっている。Type 1 の CGH は (2.20) 式の位相変調を行うものである。

$$\psi(\phi, a) = f(a)\phi \quad (2.20)$$

このとき $h(x, y)$ のフーリエ級数の係数は

$$c_q^a = \text{sinc}[q - f(a)] \quad (2.21)$$

となる。ここで、 $\text{sinc}(\xi) \equiv (\pi\xi)^{-1} \sin(\pi\xi)$ である。

$$\text{sinc}[1 - f(a)] = a \quad (2.22)$$

となるように $f(a)$ を決定すると、 $A = 1$ で符号化条件の (2.17) 式は満たされる。Type 3 の CGH は (2.23) 式の位相変調を行うものである。

$$\psi(\phi, a) = f(a) \sin(\phi) \quad (2.23)$$

このとき $h(x, y)$ のフーリエ級数の係数は第一種ベッセル関数 J_q を用いて

$$c_q^a = J_q[f(a)] \quad (2.24)$$

となり、符号化条件は

$$J_1[f(a)] = Aa \quad (2.25)$$

となる。従って J_1 の逆関数を J_1^{-1} とするとき

$$f(a) \equiv J_1^{-1}(Aa) \quad (2.26)$$

と定義すればよい。この時 $0 \leq a \leq 1$ に対して $f(a)$ を定義するためには $A \leq 0.5819$ とする必要がある。

2.4 非点収差

動径方向および方位角方向のモード指数がそれぞれ 0, 1 の LG_0^1 ビームに $z = 0$ で非点収差を導入する。円筒座標系 (ρ, φ, z) を用いると複素振幅は (2.27) 式となる。

$$\begin{aligned} u(x, y, z = 0) &= \frac{1}{w_0} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \\ &\times \exp \left\{ -x^2 \left(\frac{1}{w_0^2} - \frac{ik}{2R_x} \right) \right\} \exp \left\{ -y^2 \left(\frac{1}{w_0^2} - \frac{ik}{2R_y} \right) \right\} \\ &\times \exp \left[-\frac{1}{2}i \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{-2z_{0x}}{kw_{0x}^2} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{-2z_{0y}}{kw_{0y}^2} \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (2.27)$$

ここで、 w_0 は $z = 0$ でのビーム径、 R_x と R_y はそれぞれ x 方向と y 方向の波面の曲率半径、 z_{0x} と z_{0y} はそれぞれ x 方向と y 方向でビーム径が最小となる位置を表す。 $R_x(z) \neq R_y(z)$ のとき、 x 方向と y 方向の曲率半径の違いにより強度分布に楕円形の歪みが生じる。導入した非点収差は位相変調 $\exp \left[\frac{ik}{2} \left(\frac{1}{R_y} - \frac{1}{R_x} \right) y^2 \right]$ である。この位相変調をホログラムで付与することで非点収差を持つビームを実現する。

第3章 実験機器と設定条件

3.1 空間光変調器

空間光変調器 (spatial light modulator ; SLM) は、SLM ヘッダとコントローラで構成されており、入射した光の位相と振幅を変調する空間光変調素子である。SLM に目的の位相や振幅に変調するための情報として CGH を入力することで、入射光に対して変調された出射光を得ることができる。

本研究では浜松ホトニクス社の LCOS-SLM(Liquid Crystal on Silicon-Spatial Light Modulator)(X10468-01) を用いる。この LCOS-SLM は、アドレス部に CMOS 技術を応用して液晶を直接電圧制御することにより、高精度と高速応答を実現した反射型電気アドレス空間光変調器である。最適な光学設計により高い回折効率と光利用効率を実現している。PC に SLM をディスプレイ装置として接続し、SLM に 0~255(256 階調) の輝度値で構成される画像を入力すると、画素ごとに輝度値に対応した電圧が加えられ、位相変調量が制御される。また、本 SLM では入射する直線偏光の偏光方向と SLM ヘッダ部の液晶分子の配向方向が一致したときに位相変調を行う。本研究で使用する LCOS-SLM の仕様を表 3.1 に示す。

表 3.1: 本研究で使用する空間光変調器 (X10468-01) の仕様

画素数	800[H]×600[V]pixels
1 画素の大きさ	20×20 μm^2
開口率	98%
アドレス	8bit
リフレッシュレート	60Hz

3.2 使用する PC の仕様および画面設定

本研究で使用する PC の仕様を表 3.2 に示す。

表 3.2: 本研究で使用する PC の仕様

型番	Panasonic Let's note SZ5 CF-SZ5WDKRR
OS	Windows7
アドレス	64bit
解像度	1280×800

本研究では PC から出力された画像を SLM コントローラに送ることによって位相変調を行う。PC 上の操作には浜松ホトニクス社より提供されている LCOS-SLM 制御ソフトウェア (LcosControl) を用いた。このソフトウェアでは、SLM で表示する計算機ホログラム (Computer Generated Hologram ; CGH) を操作する機能の他に、設計値となる画像を登録した後に Create CGH コマンドを実行することでフーリエ変換し、元画像の CGH とすることが出来る。SLM コントローラの入力端子は DVI 規格なので、PC の HDMI 端子に HDMI-DVI 変換アダプタを接続し、出力側の DVI 端子に SLM コントローラの DVI 端子を接続した。PC のディスプレイを第一画面とし、SLM を第二画面として接続した。SLM に画像を表示する際、元のアスペクト比をそのまま表示するようにスケーリングの設定を行った。第一画面と第二画面の設定を表 3.3, 表 3.4 に示す。

表 3.3: 第一画面の設定

ディスプレイ (S)	Internal LCD
解像度 (R)	1280×800
向き (O)	横
複数のディスプレイ	表示画面を拡張する

表 3.4: 第二画面の設定

ディスプレイ (S)	ディスプレイデバイスの場所:HDMI
解像度 (R)	800×600
向き (O)	横
複数のディスプレイ	表示画面を拡張する
ディスプレイ	デジタルディスプレイ
リフレッシュレート	85Hz
回転	標準表示にする
スケーリング	ディスプレイ・スケーリングを保持する

第4章 SLMの動作確認実験

4.1 実験方法

本研究で使用した実験器具を以下に示す。

- He-Ne レーザー (NEC, GLG5360, 波長:632.8nm))
- 対物レンズ (倍率 $\times 10$)
- 平凸レンズ 1($f=50\text{mm}$)
- 平凸レンズ 2($f=400\text{mm}$)
- 平凸レンズ 3($f=200\text{mm}$)
- 円筒面レンズ ($f=200\text{mm}$)
- 空間フィルタ (直径 $25\mu\text{m}$)
- $1/2$ 波長板
- ミラー
- ビームスプリッター (BS)
- ND フィルター
- CCD カメラ (浜松ホトニクス C5948 および キャプチャーボード Cyber-tek CT3000, 有効画素数: 756×483 , 画素サイズ: $13.5\mu\text{m} \times 13.5\mu\text{m}$, 計測範囲: $8.7\text{mm} \times 6.5\text{mm}$)
- 空間光変調器 (浜松ホトニクス, LCOS-SLM X10468-01, 有効画素数: 792×600 , 画素サイズ: $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$, 液晶範囲: $15.8\text{mm} \times 12\text{mm}$)

本実験で使用する SLM の動作確認実験の手順を述べる。作成した光学系を図 4.1 に示す。本実験ではレーザーから出射した光を SLM ヘッドの液晶部に入射し、反射した光を CCD カメラで観察する。液晶部の広範囲にビームが当たるようにするため、対物レンズと平凸レンズを使用してレーザーから出射した光のビーム径を 5mm に拡大した。本実験で使用しているレーザーの偏光状態は s 偏光である。設置方向を考慮すると、SLM への入射光は p 偏光である必要があるため、進相軸が実験台の鉛直方向から 45° 傾いた $1/2$

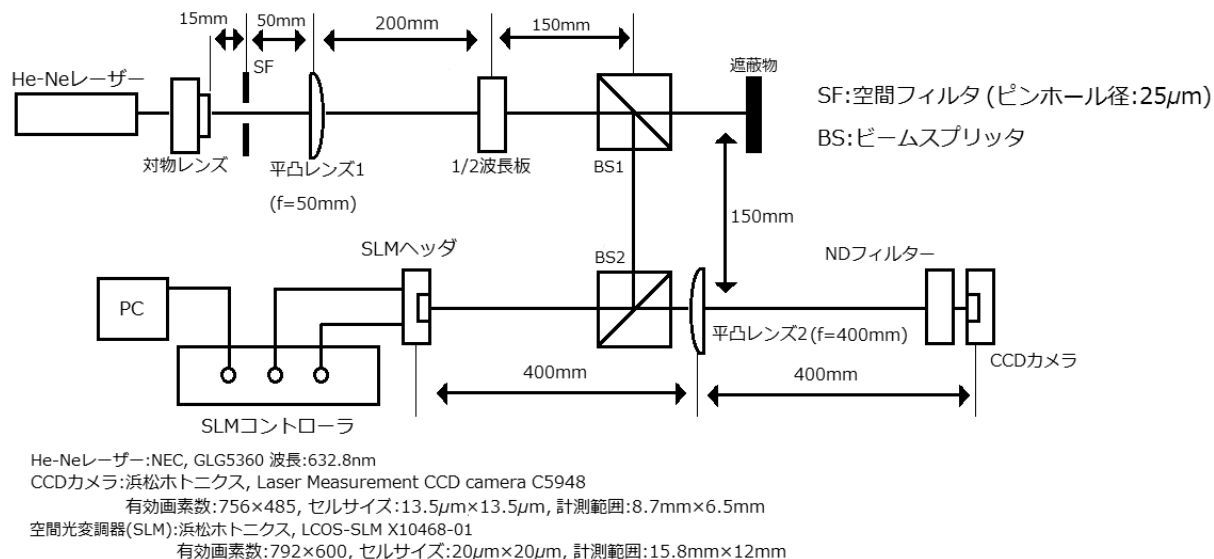


図 4.1: SLM の動作確認実験に用いる光学系

波長板の中心を通すことにより、p 偏光に偏光状態を変えた。SLM からの反射光は平凸レンズを通過し、通過したレンズの焦点の位置で CCD カメラを用いて強度分布の観察を行う。平凸レンズを組み込むことにより、SLM からの反射光の複素振幅分布をフーリエ変換した分布を通過したレンズの焦点の位置で得ることができる。実験には浜松ホトニクス社より提供されている 4 種類の画像と制御ソフトウェア LcosControl を利用した。画像を LcosControl に登録し、Create CGH コマンドで作成した CGH を SLM に表示した。元画像と作成した CGH を図 4.2～図 4.9 に示す。それぞれの CGH を表示したときにフーリエ変換前の画像パターンの像を CCD カメラで撮影できるかを確認した。

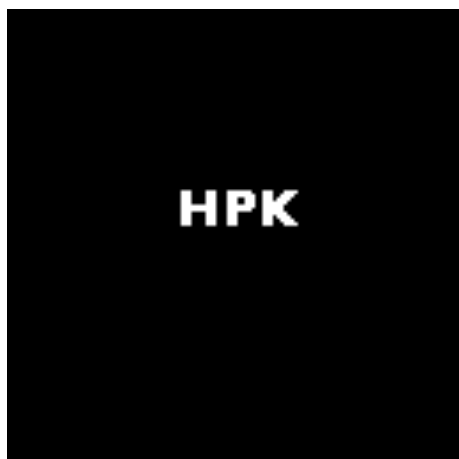


図 4.2: 画像 1

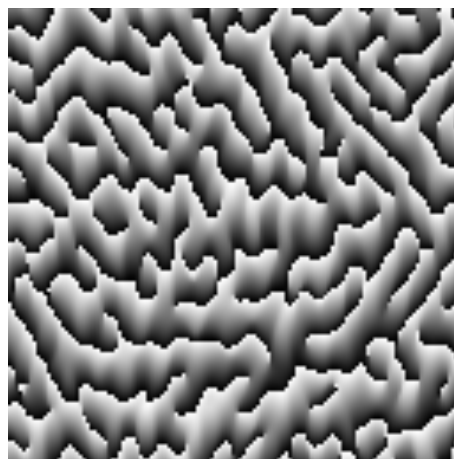


図 4.3: 画像 1(Create CGH 実行後)

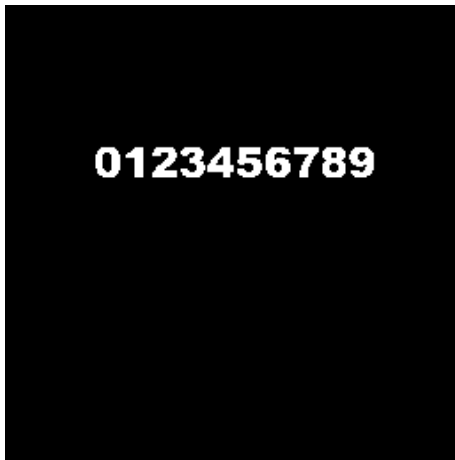


図 4.4: 画像 2

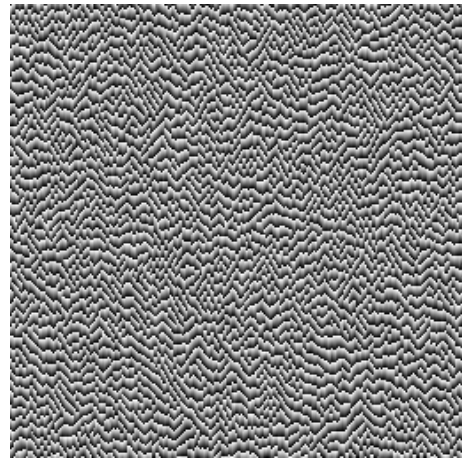


図 4.5: 画像 2(Create CGH 実行後)

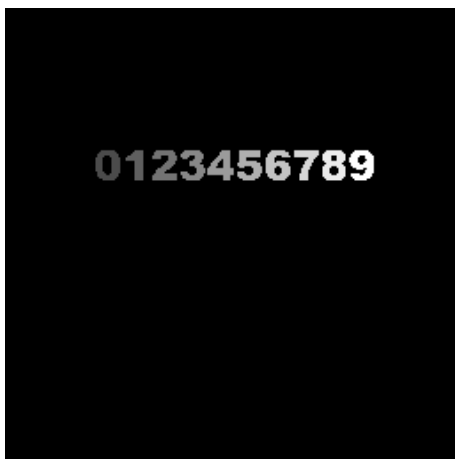


図 4.6: 画像 3

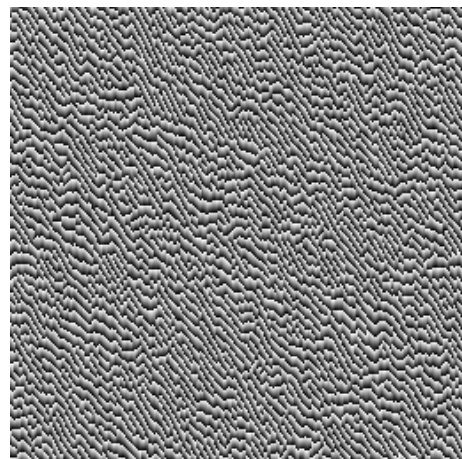


図 4.7: 画像 3(Create CGH 実行後)

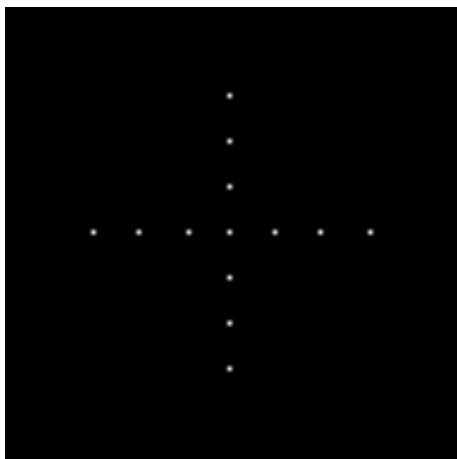


図 4.8: 画像 4



図 4.9: 画像 4(Create CGH 実行後)

4.2 実験結果

Create CGH 実行後の画像を SLM に表示したときの CCD カメラ上の光強度分布を図 4.10～図 4.13 に示す。

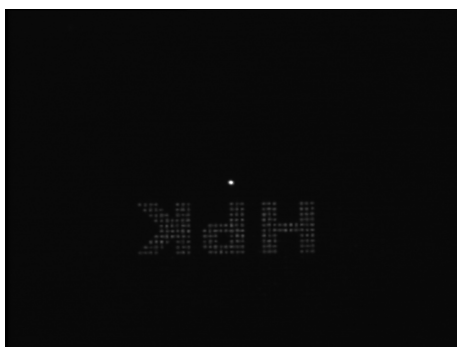


図 4.10: 画像 1 を表示したときの光強度分布



図 4.11: 画像 2 を表示したときの光強度分布

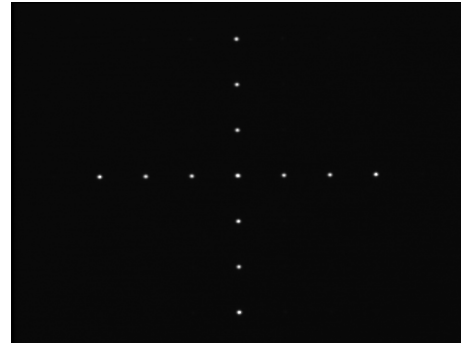


図 4.12: 画像 3 を表示したときの光強度分布 図 4.13: 画像 4 を表示したときの光強度分布

図 4.2 と図 4.10 の結果から、画像 1 から作成した CGH を表示したときに元の画像 1 のような像を撮影できたことがわかる。また、図 4.4 と図 4.11、図 4.6 と図 4.12、図 4.8 と図 4.13 の結果を比較した場合についても同様であるため、入射光は SLM によって正しく位相変調されていると判断した。入力した画像に対して光軸について対称な再生像が得られたが、これは図 4.1 においてフーリエ変換用の平凸レンズ 2 の前後の焦点の位置に SLM ヘッダと CCD カメラを設置していたためだと考えられる。

第5章 SLMの表示倍率測定実験

5.1 実験方法

CGHをSLMの液晶部に表示する際に、設計に比べどの程度の倍率で表示されるかを調査するため、自分で設定したホログラムピッチと測定した強度分布から計算して得られたホログラムピッチを比較した。参考文献 [3] にある表示倍率の測定実験とはSLMとPCの設定条件が異なっている。実験はSLMの動作確認に用いた図 4.1 と同様の光学系で行った。

本実験ではホログラムピッチ 30 μm , 60 μm , 90 μm , 120 μm , 150 μm , 180 μm , 210 μm , 240 μm , 270 μm を想定した位相変調パターンを LcosControl を用いて SLM に表示した。SLM から出射してきた光はレンズ ($f=400\text{mm}$) を用いてフーリエ変換し、レンズの焦点距離の位置に設置した CCD カメラに入射した。CCD カメラ上で強度分布を観察し、0 次回折光と 1 次回折光の距離から SLM 上で表示されているホログラムピッチを計算した。CCD カメラ上で 0 次回折光と 1 次回折光の距離を求める計算方法を以下に示す。

$$\text{回折次数間の距離} = \text{画素単位の距離} \times \text{カメラの画素ピッチ} \quad (5.1)$$

次に 0 次回折光と 1 次回折光の距離から回折角 α を計算した。回折角を α 、CCD カメラ上の 0 次回折光と 1 次回折光の距離を X 、レンズ ($f=400\text{mm}$) から CCD カメラまでの距離を Y とすると求める式は以下である。

$$\tan \alpha = \frac{X}{Y} \quad (5.2)$$

最後に回折角 α から SLM 上で表示されているホログラムピッチを計算した。SLM 上で表示されているホログラムピッチを Λ 、レーザーの波長を λ とすると求める式は以下である。

$$\Lambda = \lambda(\sin \alpha)^{-1} \quad (5.3)$$

(5.2) 式を式 (5.3) に代入すると以下の式が得られる。

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sin(\tan^{-1} \frac{X}{Y})} \quad (5.4)$$

図 5.1～図 5.18 に作成した CGH とその拡大図を示す。

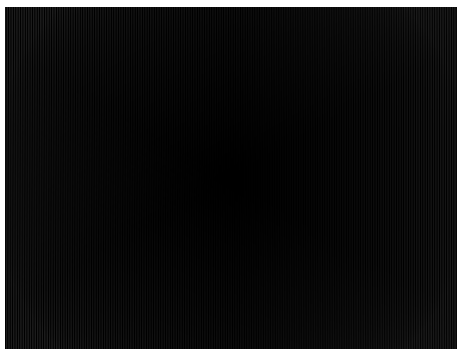


図 5.1: ホログラムピッチ 30 μ m の CGH

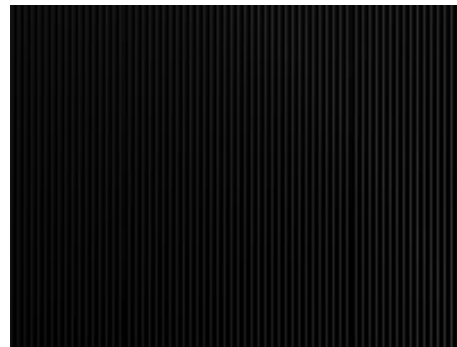


図 5.2: ホログラムピッチ 30 μ m の CGH, 拡大図
(4 倍)

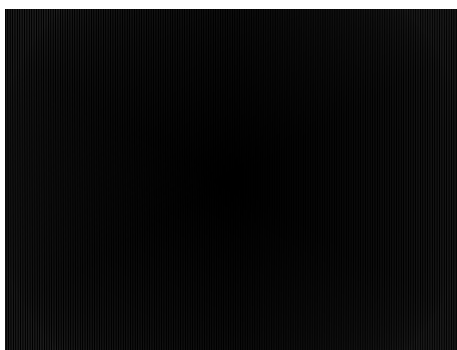


図 5.3: ホログラムピッチ 60 μ m の CGH

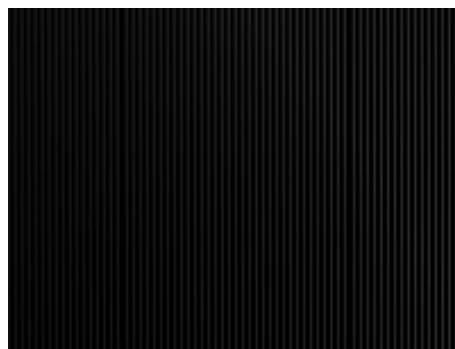


図 5.4: ホログラムピッチ 60 μ m の CGH, 拡大図
(4 倍)

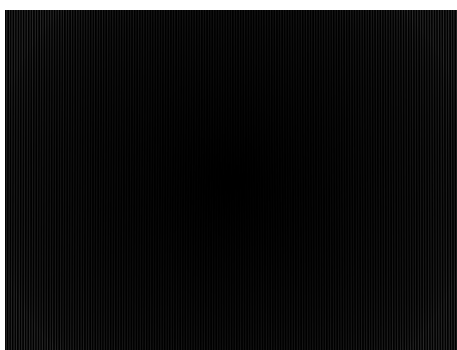


図 5.5: ホログラムピッチ 90 μ m の CGH

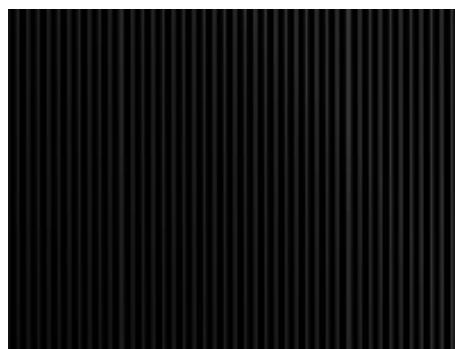


図 5.6: ホログラムピッチ 90 μ m の CGH, 拡大図
(4 倍)

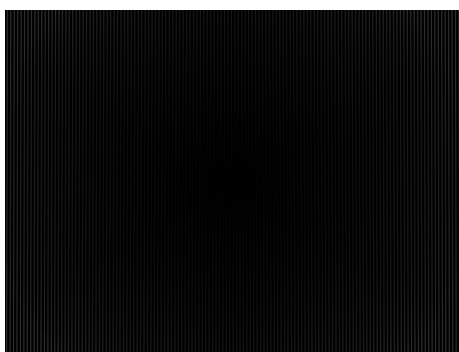


図 5.7: ホログラムピッチ 120 μm の CGH



図 5.8: ホログラムピッチ 120 μm の CGH, 拡大図 (4 倍)

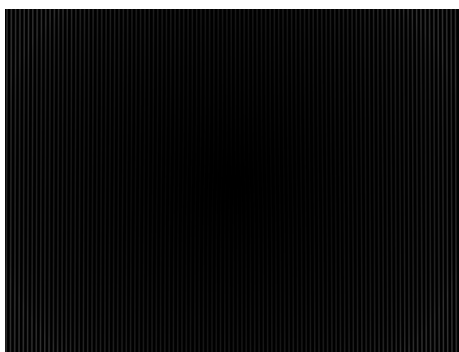


図 5.9: ホログラムピッチ 150 μm の CGH



図 5.10: ホログラムピッチ 150 μm の CGH, 拡大図 (4 倍)

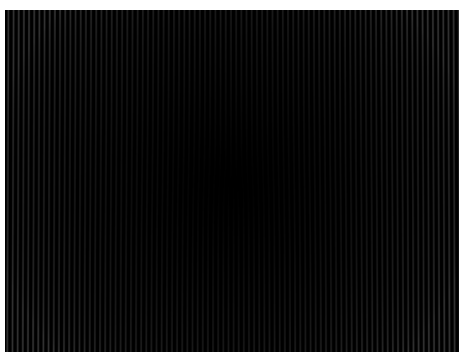


図 5.11: ホログラムピッチ 180 μm の CGH



図 5.12: ホログラムピッチ 180 μm の CGH, 拡大図 (4 倍)

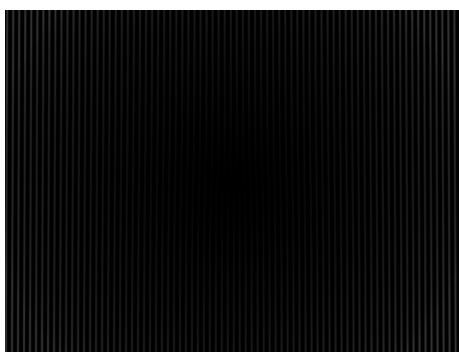


図 5.13: ホログラムピッチ $210\mu\text{m}$ の CGH



図 5.14: ホログラムピッチ $210\mu\text{m}$ の CGH, 拡大図 (4 倍)

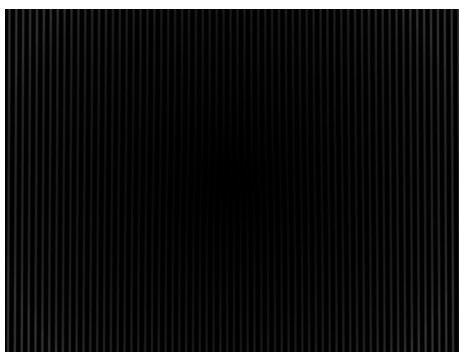


図 5.15: ホログラムピッチ $240\mu\text{m}$ の CGH



図 5.16: ホログラムピッチ $240\mu\text{m}$ の CGH, 拡大図 (4 倍)

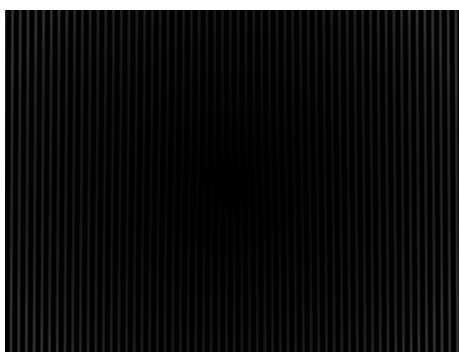


図 5.17: ホログラムピッチ $270\mu\text{m}$ の CGH

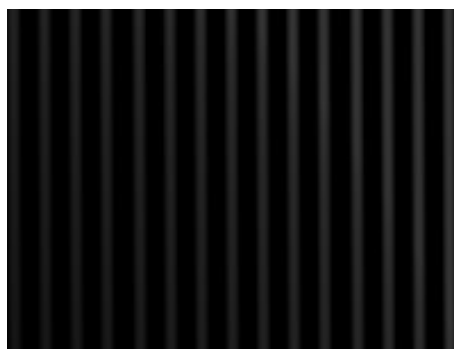


図 5.18: ホログラムピッチ $270\mu\text{m}$ の CGH, 拡大図 (4 倍)

5.2 実験結果

図 5.1～図 5.18 の CGH を SLM に表示したとき CCD カメラ上の強度分布を図 5.19～図 5.27 に示す。また、結果から求めた 0 次回折光と 1 次回折光の間の距離を表 5.1 に示す。



図 5.19: ホログラムピッチ 30 μm の CGH を表示したときの強度分布

図 5.20: ホログラムピッチ 60 μm の CGH を表示したときの強度分布



図 5.21: ホログラムピッチ 90 μm の CGH を表示したときの強度分布

図 5.22: ホログラムピッチ 120 μm の CGH を表示したときの強度分布



図 5.23: ホログラムピッチ 150 μm の CGH を表
示したときの強度分布



図 5.24: ホログラムピッチ 180 μm の CGH を表
示したときの強度分布



図 5.25: ホログラムピッチ 210 μm の CGH を表
示したときの強度分布



図 5.26: ホログラムピッチ 240 μm の CGH を表
示したときの強度分布



図 5.27: ホログラムピッチ 270 μm の CGH を表
示したときの強度分布

表 5.1: 0 次回折光と 1 次回折光の距離

想定ホログラムピッチ (μm)	0 次回折光の座標	1 次回折光の座標	回折光間の距離 (mm)
30	(143,241)	(467,241)	4.37
60	(143,241)	(467,241)	4.37
90	(143,241)	(359,241)	2.92
120	(143,241)	(305,241)	2.19
150	(143,241)	(272,241)	1.74
180	(143,241)	(251,241)	1.46
210	(143,241)	(235,241)	1.24
240	(143,241)	(224,241)	1.09
270	(143,241)	(215,241)	0.97

0 次回折光と 1 次回折光の間の距離から実測ホログラムピッチを計算した。結果を表 5.2 および図 5.28 に示す。

表 5.2: 想定ホログラムピッチと実測ホログラムピッチ

想定ホログラムピッチ (μm)	実測ホログラムピッチ (μm)
30	57.9
60	57.9
90	86.8
120	115.7
150	145.3
180	173.6
210	203.8
240	231.5
270	260.4

図 5.28 の結果から、想定ホログラムピッチ 90 μm 以上の条件で想定と実測のピッチの間に比例関係が得られた。比例係数を最尤推定法を用いて求め、CGH 画像の 1 画素が SLM 上でいくつ分の画素を用いて表示されているかを求めた。結果を図 5.29 に示す。計算により、比例関係を示す範囲内での比例係数は 0.97 ± 0.05 と求められた。

以上の結果から、PC の主画面 (1280 \times 800 画素) に対して、第二画面 (800 \times 600 画素) として SLM を接続したとき、画像 1 ピクセルが SLM 上では 0.97 ± 0.05 ピクセルで表示されることが分かった。

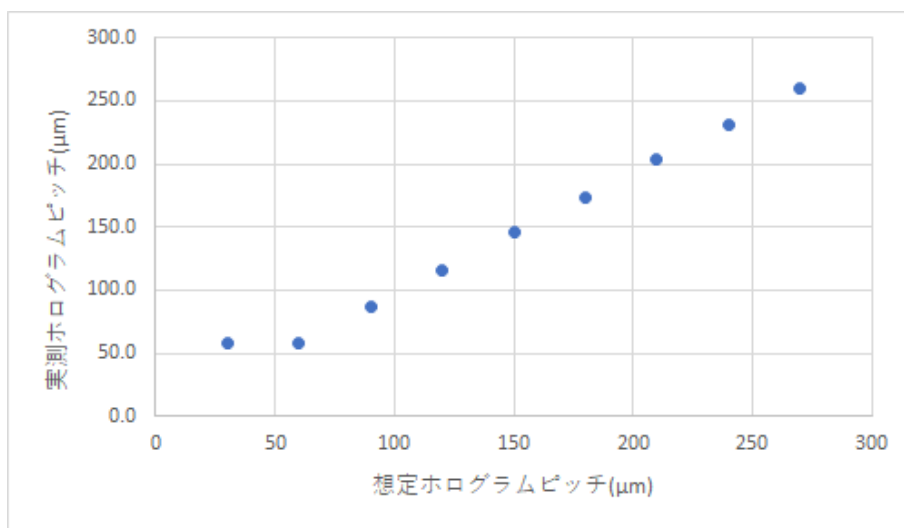


図 5.28: 想定プログラムピッチと実測プログラムピッチの関係

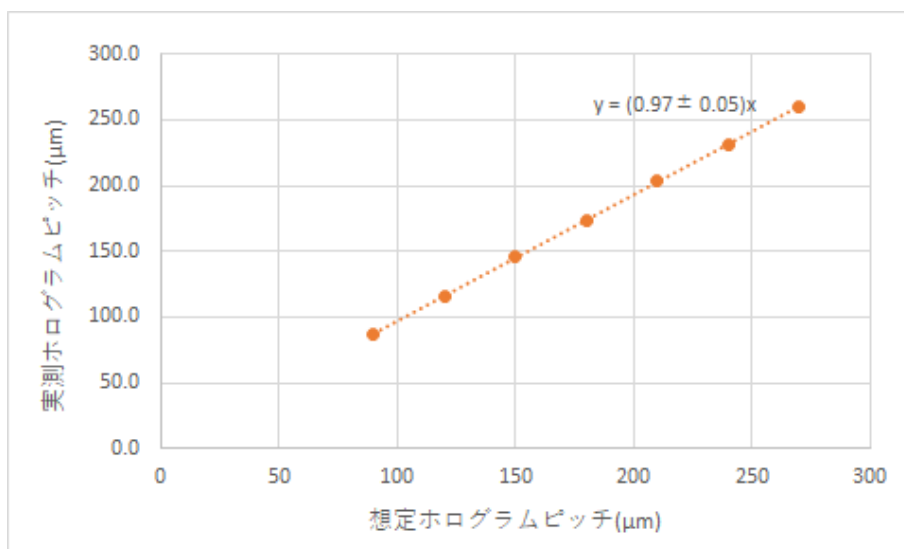


図 5.29: 想定プログラムピッチと実測プログラムピッチの比例関係

第6章 位相特異点を持たないCGHを用いた実験

6.1 実験方法

位相特異点を持たない、回折格子の役割を果たすCGHをSLMに表示したときの強度分布の観察を行った。使用した光学系を図6.1に示す。使用するCGHの解像度は、表示

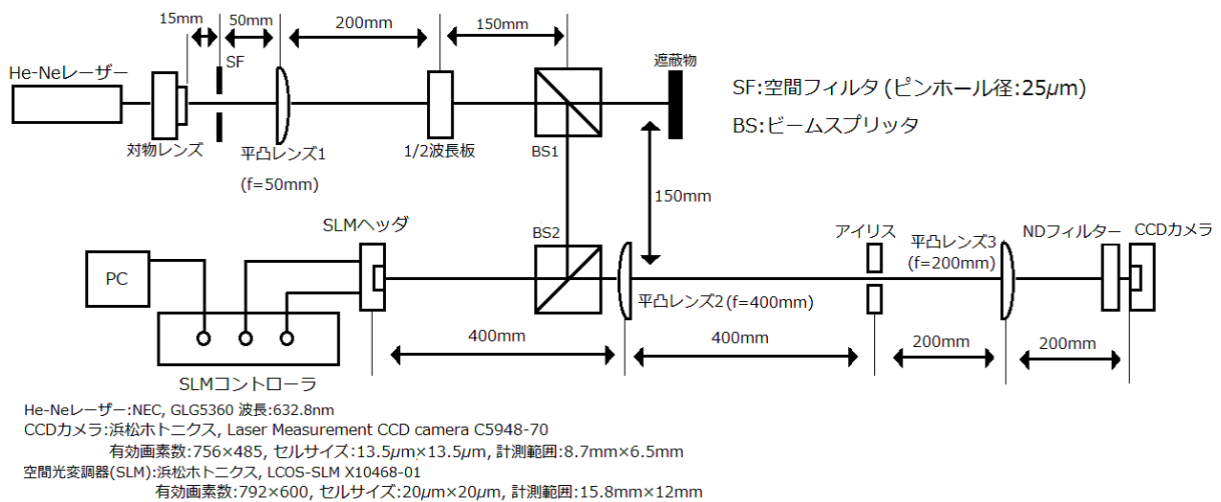


図 6.1: ビームの生成に使用した光学系

するSLM液晶部の解像度の設定に合わせ、 792×600 pixelとした。SLMの画素サイズの仕様に合わせて1画素の大きさを $20\mu\text{m}$ とした。ホログラムピッチは回折光を分離するために $240\mu\text{m}$ とし、参考文献[3]より波長632.8nmに対して輝度値186の位相変調幅が 2π であることが分かっているため、輝度値の範囲を0～186とした。使用したCGHを図6.2に示す。アイリスの位置にCCDカメラを設置して強度分布の確認を行った後、SLM液晶部の縮小像ができる位置にCCDカメラを移動させ、アイリスを全開にした場合と1次回折光のみが通過するように径を調整した場合の2パターンで観察を行った。

6.2 実験結果

アイリス位置での強度分布を図6.3に示す。また、SLM液晶部の縮小像ができる位置での強度分布をそれぞれ図6.4、図6.5に示す。図6.4から、SLM液晶部の縮小像がで

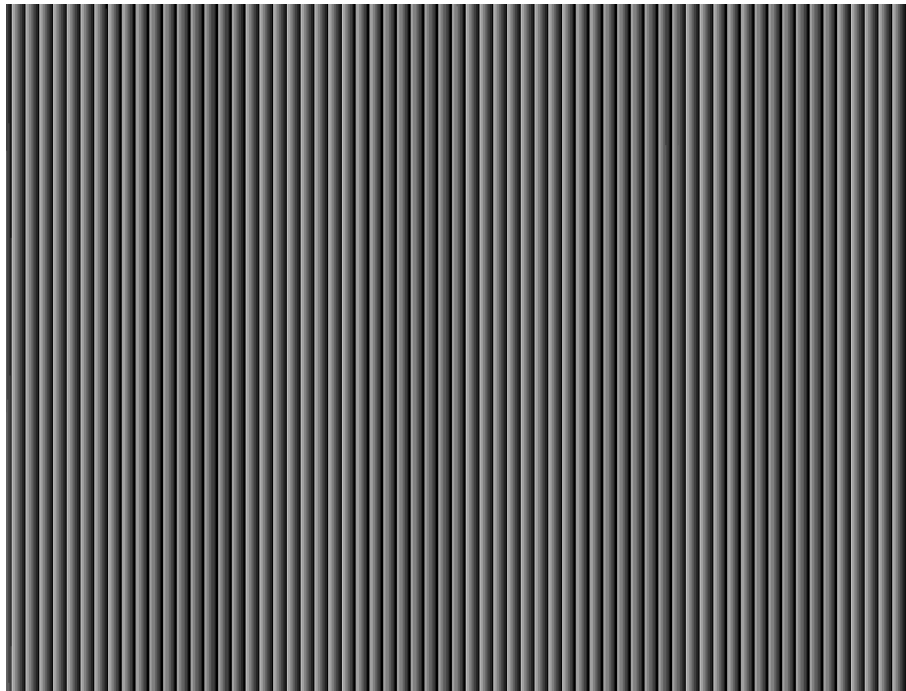


図 6.2: 位相特異点を持たない CGH

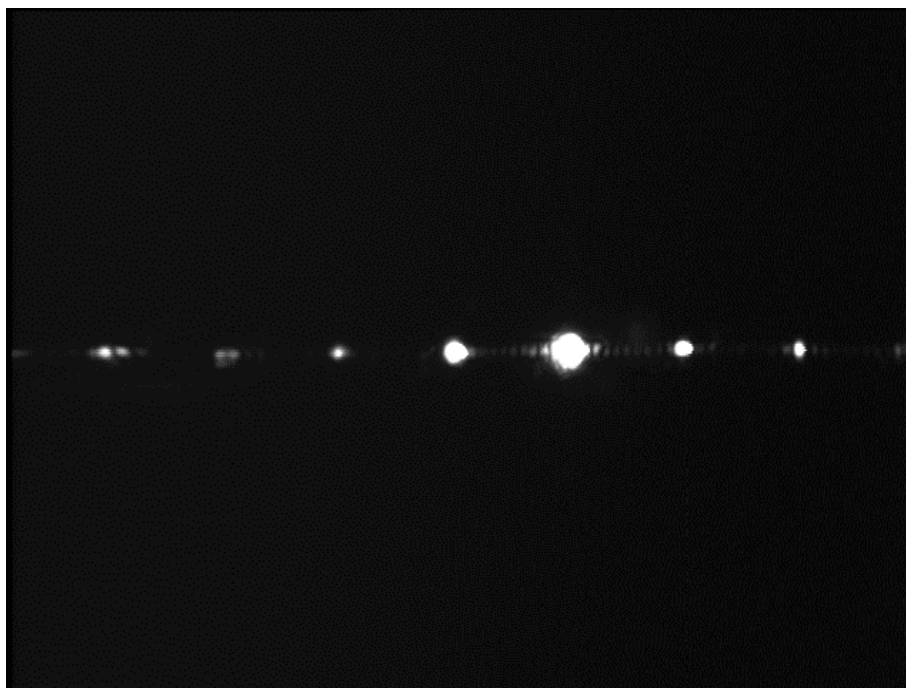


図 6.3: 位相特異点を持たない CGH を表示したときの強度分布 (アイリス位置)

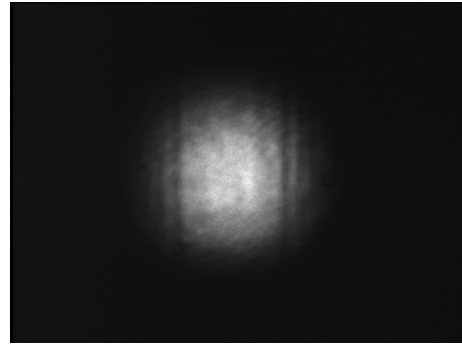
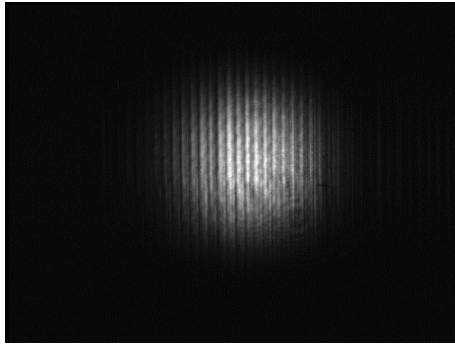


図 6.4: 位相特異点を持たない CGH を表示したときの強度分布 (縮小像の位置, 全ての回折光) 図 6.5: 位相特異点を持たない CGH を表示したときの強度分布 (縮小像の位置, 1 次回折光のみ)

きる位置では SLM に表示した CGH の縞模様が確認できた。また、図 6.3 から、アイリス位置 (フーリエ面) で各回折次数の左右に周期 7pixel の変調成分とその高調波が現れている。SLM の表示倍率測定実験の結果から、CGH 画像の 1 ピクセルが SLM 上では 0.97 ± 0.05 ピクセルで表示されることが分かっており、ちょうど 1 倍ではないことが空間周波数成分とその高調波が現れた原因と考えた。

第7章 LG ビームの生成実験

参考文献 [2] に示された 2 種類の位相変調形式で LG ビームを生成する CGH を作成し、それぞれの結果を比較した。

7.1 位相特異点を持つ Type 1 形式の CGH を用いた実験

7.1.1 実験方法

Type 1 形式の位相変調で LG ビームを生成する CGH を SLM に表示したときの強度分布の様子を観察する。以下に作成に用いたソースコードを示す。

```

function [] = phase()
%warning off all
close all %図の全てを削除
clear all %メモリに格納された変数群の削除
clc

%% Define variables
Lp=2*10^(-5); %pixel pitch
Lambda=240*10^(-6); %hologram pitch
Lx=792; %x resolution
Ly=600; %y resolution
low=0; % amount of phase modulation when luminance = 0
high=186; % amount of phase modulation when luminance = 255
m=1;
B=2*((Ly/2)-1)*Lp)^2;
brightness=186;

%% Create phase pattern
nx=(-Lx/2+1:Lx/2-1)*ones(1,Ly);
ny=(ones(Lx,1)*(-Ly/2+1:Ly/2-1));
x=Lp*nx;
y=Lp*ny;
phase=mod(m*atan2(y,x)-2*pi*x/Lambda,2*pi);

%% Create lookup table (lut)
n=1000;
t=linspace(0,2*pi,n); % to make lookup table
Index=(sin(pi*(1-t/(2*pi))))/(pi*(1-t/(2*pi)))).^2;% diffraction equation
Index(isnan(Index))=1;
a=(x.^2+y.^2)/B; % setting of diffraction efficiency
a(a>0.999)=0.999;

%% Create phase pattern for effective amplitude
sincInverse=interp1(Index,t,a); % setting of phase modulation width
SLM_phase=phase.*sincInverse/(2*pi)*brightness/(2*pi);

%% Show images
LG_image = uint8(SLM_phase); %指定のビット数に変換
imshow(SLM_phase,[low high]); %作成した CGH のプレビュー
imwrite(LG_image,'Type 1.bmp','bmp') %指定の名前とファイル形式で保存
%phase pattern

end

```

目的とする複素振幅分布の位相 ϕ を変数 phase で表した。位相特異点を持たない CGH を用いた実験と同様に、ホログラムの解像度を 792×600 pixel、1 画素の大きさを $20\mu\text{m}$ 、ホログラムピッチを $240\mu\text{m}$ 、輝度値の範囲を $0 \sim 186$ とした。Type 1 の CGH は (2.20) 式の位相変調を行うものである。(2.22) 式の符号化条件から配列 Index を計算し、 a に対応する $t/2\pi$ の値を求め、 sincInverse の値とした。 $\text{sincInverse} = f(a)$ と $\sin(\text{phase}) = \sin(\phi)$ から位相変調 ψ を求め、輝度値に換算することで、グレースケール画像を生成するための SLM_phase とした。コードを実行し、ホログラム画像を出力した。生成したホログラム画像を図 7.1 に示す。実験には図 6.1 と同様の光学系を用いた。ソフトウェア LcosControl に登録したホログラム画像を SLM に表示し、CCD カメラで強度分布の観察を行った。

観察はアイリス位置 (フーリエ面) 近辺と SLM 液晶部の縮小像ができる位置で行った。

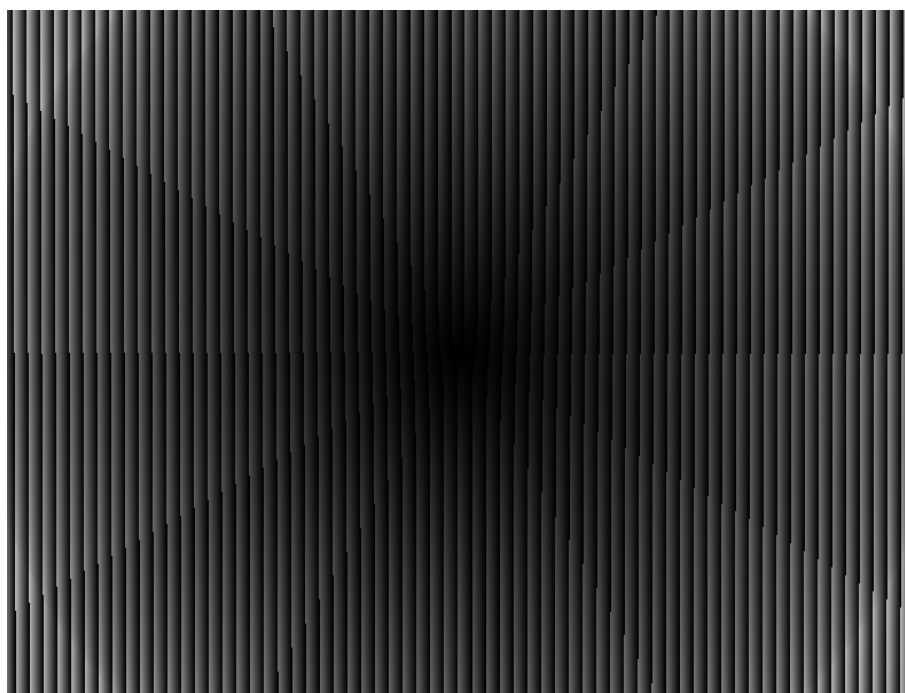


図 7.1: Type 1 形式で LG ビームを生成する CGH

7.1.2 実験結果

アイリス位置での強度分布を図 7.2～図 7.3 に示す。また、SLM 液晶部の縮小像ができる位置での強度分布を図 7.6 に示す。



図 7.2: Type 1 の CGH を表示したときの強度分布 (アイリス位置, 全ての回折光)

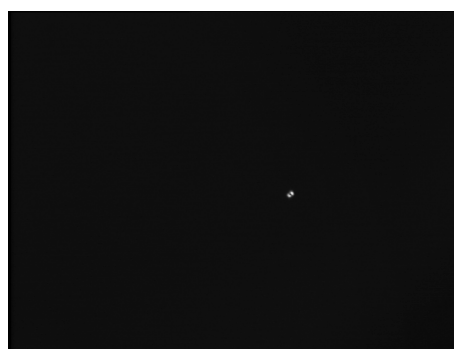


図 7.3: Type 1 の CGH を表示したときの強度分布 (アイリス位置, 1 次回折光のみ)

図 7.6 から、中心に穴のあるドーナツ状の強度分布を持つ LG ビームの特徴を示すビームであることがわかる。また、ドーナツ状の部分が全体的にボコボコしている。

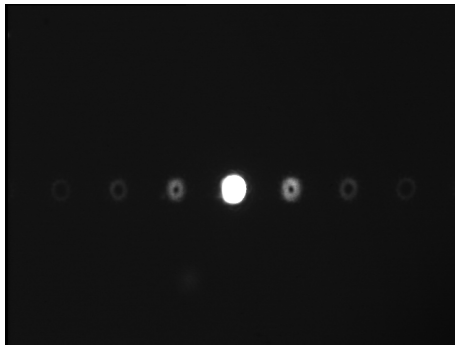


図 7.4: Type 1 の CGH を表示したときの強度
分布 (アイリス位置から 50mm 伝搬後, 全ての回 布 (アイリス位置から 50mm 伝搬後, 1 次回折光
折光)



図 7.5: Type 1 の CGH を表示したときの強度分
布 (アイリス位置から 50mm 伝搬後, 1 次回折光
のみ)

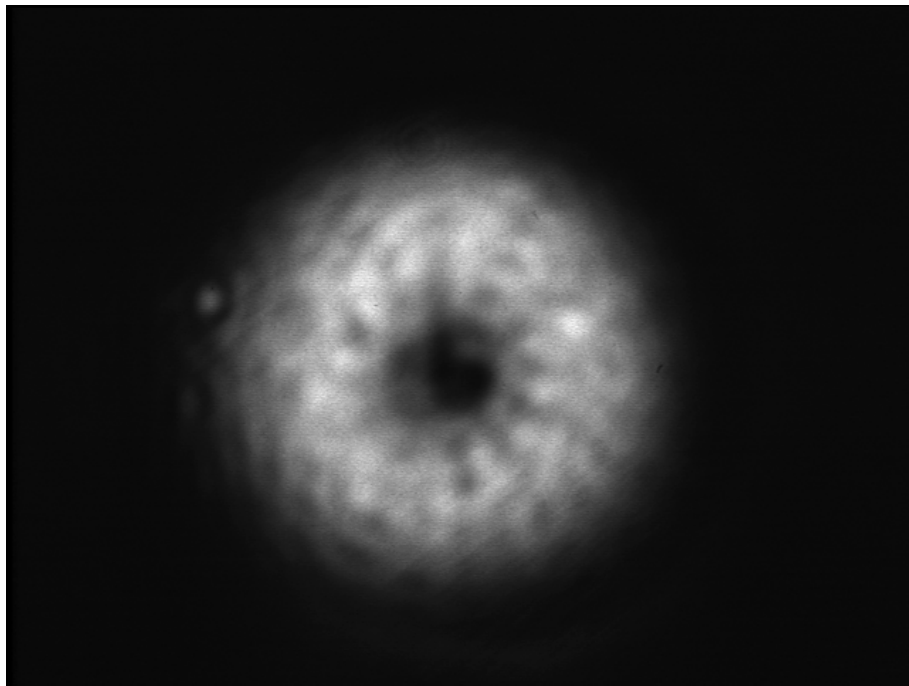


図 7.6: Type 1 の CGH を表示したときの強度分布 (SLM の縮小像の位置, 1 次回折光のみ)

7.2 位相特異点を持つ Type 3 形式の CGH を用いた実験

7.2.1 実験方法

Type 3 形式の位相変調で LG ビームを生成する CGH を SLM に表示したときの強度分布の様子を観察する。実験には図 6.1 と同様の光学系を用いる。SLM に表示する CGH を MATLAB を用いて作成した。以下に作成に用いたソースコードを示す。

```
function [] = phase()
%warning off all
close all %図の全てを削除
clear all %メモリに格納された変数群の削除
clc

%% Define variables
Lp=2*10^(-5); %pixel pitch
Lambda=240*10^(-6); %hologram pitch
Lx=792; %x resolution
Ly=600; %y resolution
low=0; % amount of phase modulation when luminance = 0
high=186; % amount of phase modulation when luminance = 255
m=1;
B=2*((Ly/2)-1)*Lp^2;
brightness=186;

%% Create phase pattern
nx=(-Lx/2:1:Lx/2-1)*ones(1,Ly);
ny=(ones(Lx,1)*(-Ly/2:1:Ly/2-1));
x=Lp*nx;
y=Lp*ny;
phase=mod(m*atan2(x,y)-2*pi*x/Lambda,2*pi);

%% Create lookup table (lut)
n=1000;
t=linspace(0,1.84*2*pi,n); % to make lookup table
A=0.5819;
Index=besselj(1,t/(2*pi))./A; %diffraction equation
Index(isnan(Index))=0;
a=(sqrt(x.^2+y.^2))/sqrt(B);
a(a>0.999)=0.999;

%% Create phase pattern for effective amplitude
sincInverse=interp1(Index,t/(2*pi),a); % setting of phase modulation width
SLM_phase=(sin(phase)).*sincInverse*brightness/(2*pi);

%% Show images
LG_image = uint8(SLM_phase); %指定のビット数に変換
imshow(SLM_phase,[low high]); %作成した CGH のプレビュー
imwrite(LG_image,'Type 3.bmp','bmp') %指定の名前とファイル形式で保存
%phase pattern

end
```

目的とする複素振幅分布の位相 ϕ を変数 phase で表した。Type 1 形式の CGH を用いた実験と同様に、ホログラムの解像度を 792×600 pixel、1 画素の大きさを $20\mu\text{m}$ 、ホログラ

ムピッチを $240\mu\text{m}$ 、輝度値の範囲を $0\sim 186$ とした。位相変調幅 t の値の範囲を $J_1(x)$ が単調増加する範囲 $0 \leq x \leq 1.84$ で設定し、 A の値を (2.26) 式の符号化条件から求めた最大値 0.5819 と設定した。(2.26) 式と $t/2\pi = J_1^{-1}(A \times \text{Index})$ を対応させ、 $\text{Index} = J_1(t/2\pi)/A$ と変形して配列 Index を計算した。 a に対応する $t/2\pi$ の値を求め、sinInverse の値とした。 $\sin\text{Inverse} = f(a)$ と $\sin(\text{phase}) = \sin(\phi)$ から位相変調 ψ を求め、輝度値に換算することで、グレースケール画像を生成するための SLM_phase とした。コードを実行し、ホログラム画像を出力した。生成したホログラム画像を図 7.7 に示す。実験には図 6.1 と同様の光学系を用いた。ソフトウェア LcosControl に登録したホログラム画像を SLM に表示し、CCD カメラ上での強度分布を観察した。

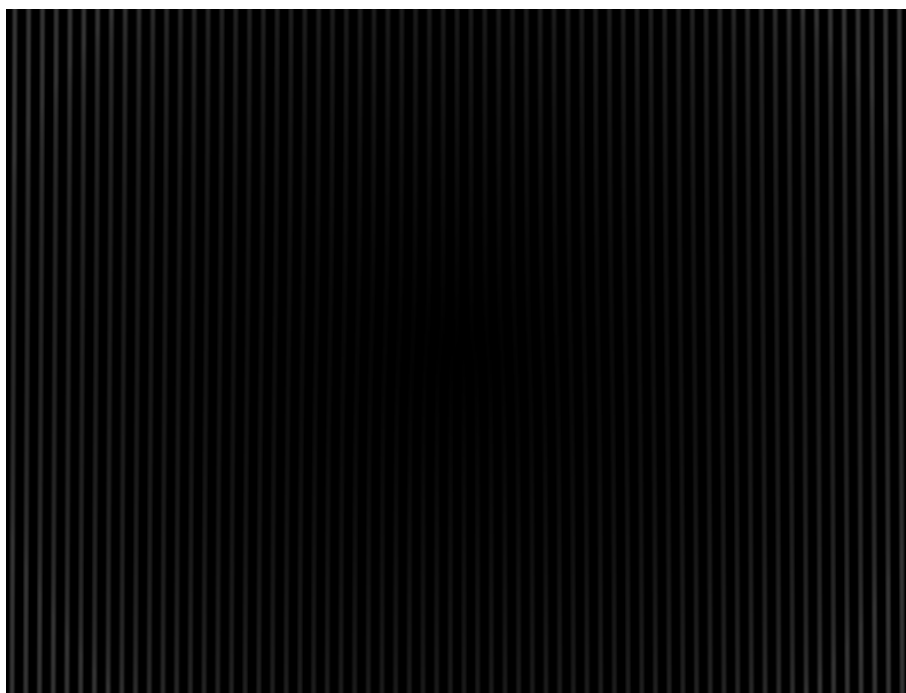


図 7.7: Type 3 形式で LG ビームを生成する CGH

7.2.2 実験結果

アイリス位置での強度分布を図 7.8～図 7.9 に示す。また、SLM 液晶部の縮小像ができる位置での強度分布を図 7.12 に示す。

図 7.8～図 7.12 から、中心に穴のあるドーナツ状の強度分布を持つ LG ビームの特徴を示すビームであることがわかる。しかし、ドーナツ状の部分に含まれるまだら模様のムラが Type 1 形式の CGH を用いた結果に比べても大きい。



図 7.8: Type 3 の CGH を表示したときの強度分布 (アイリス位置, 全ての回折光)

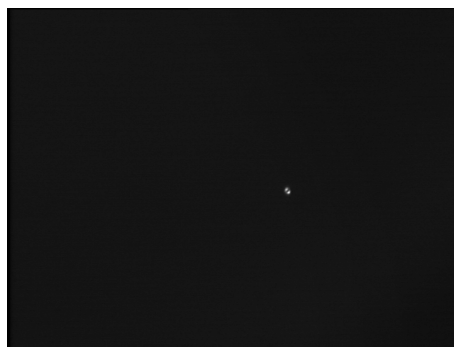


図 7.9: Type 3 の CGH を表示したときの強度分布 (アイリス位置, 1 次回折光のみ)

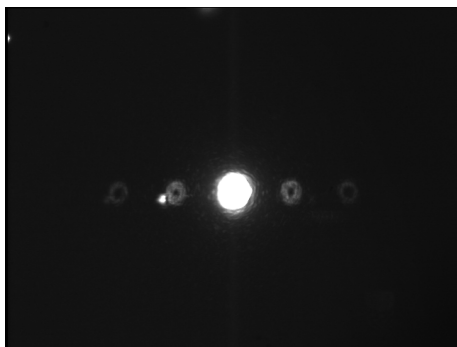


図 7.10: Type 3 の CGH を表示したときの強度分布 (アイリス位置から 50mm 伝搬後, 全ての回折光)



図 7.11: Type 3 の CGH を表示したときの強度分布 (アイリス位置から 50mm 伝搬後, 1 次回折光のみ)

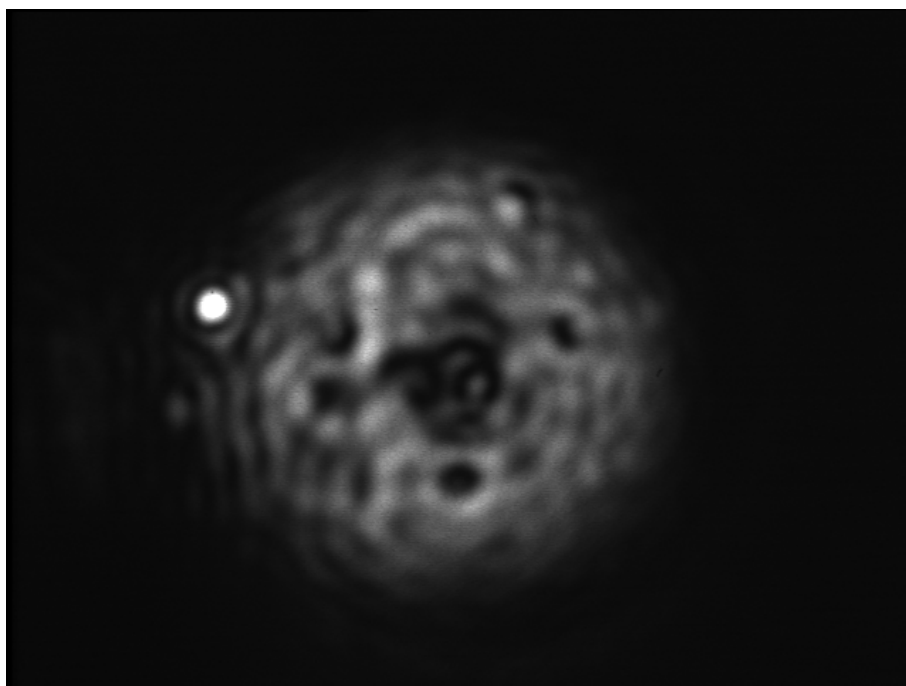


図 7.12: Type 3 の CGH を表示したときの強度分布 (SLM の縮小像の位置, 1 次回折光のみ)

第8章 非点収差を持つLGビームの生成実験

本章では非点収差を持つLGビームを発生させ、位相特異点の反転の制御を行う。非点収差を持つLGビームを生成する手段として、7章で生成した非点収差を持たないLGビームを円筒面レンズに入射させる方法、非点収差を持つLGビームを直接生成するCGHを用いる方法、円筒面レンズとCGHを併用してビームに非点収差を加える方法を実行する。

8.1 円筒面レンズを用いた非点収差を持つLGビームの生成実験

8.1.1 実験方法

円筒面レンズを用いて非点収差を持つLGビームを生成する実験を行う。図8.1に使用した光学系を示す。

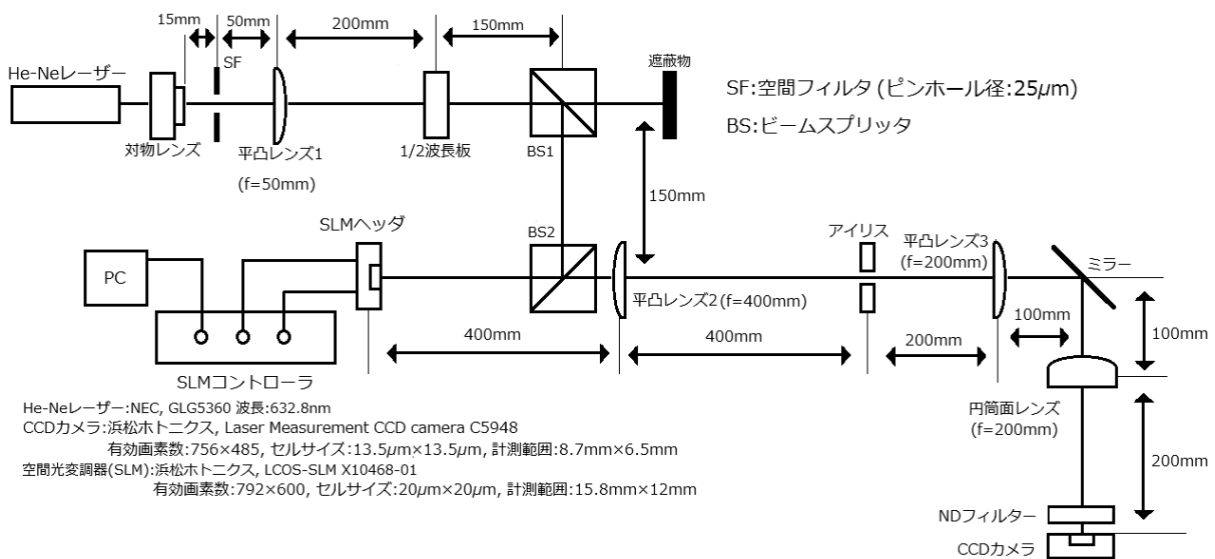


図 8.1: 円筒面レンズと CGH を併用した非点収差を持つ LG ビームの生成に用いた光学系

SLM 液晶部の縮小像ができる位置に円筒面レンズ ($f=200\text{mm}$) を設置し、その焦点距離の位置での強度分布を確認する。円筒面レンズを通過したビームはその設置方向によって鉛直あるいは水平方向のみに集光する。本実験では鉛直方向のみに集光するように設置した。SLM に表示する CGH は、Type 1 形式で LG ビームを生成する CGH(図

7.1)、Type 3 形式で LG ビームを生成する CGH(図 7.7) に加え、位相特異点を持たない CGH(図 6.2) の 3 種類を用いた。

8.1.2 実験結果

3 種類の CGH を切り替えて円筒面レンズの焦点距離の位置での強度分布の観察を行った。位相特異点を持たない CGH については円筒面レンズの焦点距離の位置、Type 1 形式および Type 3 形式の CGH については焦点距離の前後で観察を行った。結果を図 8.2 ～図 8.8 に示す。



図 8.2: 位相特異点を持たない CGH を表示したときの強度分布

図 8.2 から、円筒面レンズを通過して鉛直方向のみに集光した様子が確認できた。また、図 8.3～図 8.8 から、円筒面レンズの焦点距離の位置で LG ビームが集光する様子が確認できた。図 8.4、図 8.7 の焦点距離での強度分布は、鉛直方向のみに集光したビームが斜めに分断された形状をしている。これは参考文献 [4] にあるように、非点収差を持つ LG ビームが伝搬過程の中で HG ビームに近い特徴を示すという現象である。また、図 8.3～図 8.5 と図 8.6～図 8.8 の結果を比較すると、Type 3 形式の CGH を用いた場合において、ビームの明るい部分の他に横方向の強度の振動が見られる。

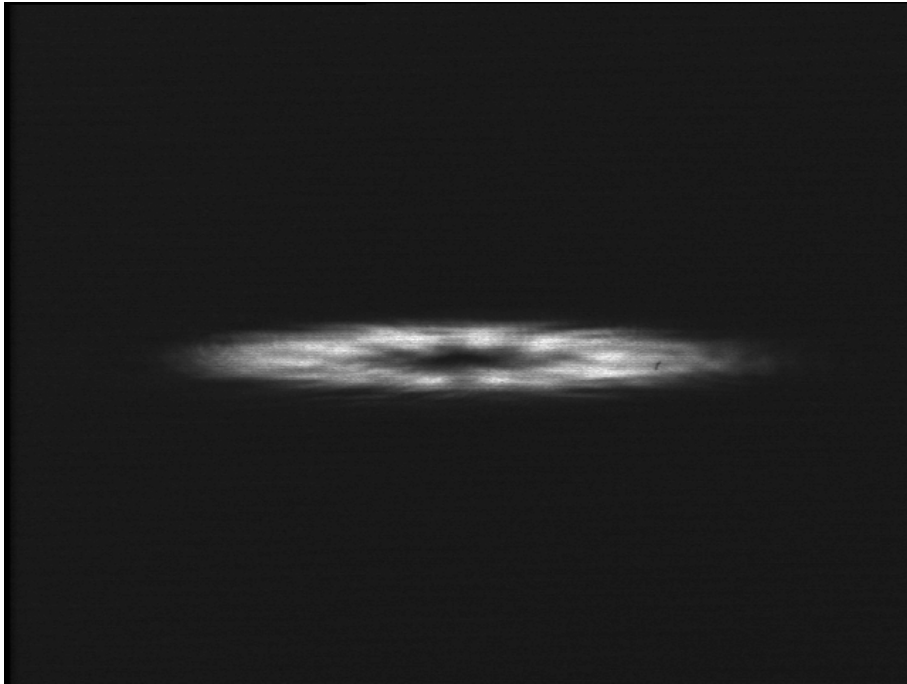


図 8.3: Type 1 の CGH を表示したときの強度分布, 円筒面レンズの焦点距離 10mm 前方



図 8.4: Type 1 の CGH を表示したときの強度分布, 円筒面レンズの焦点距離の位置

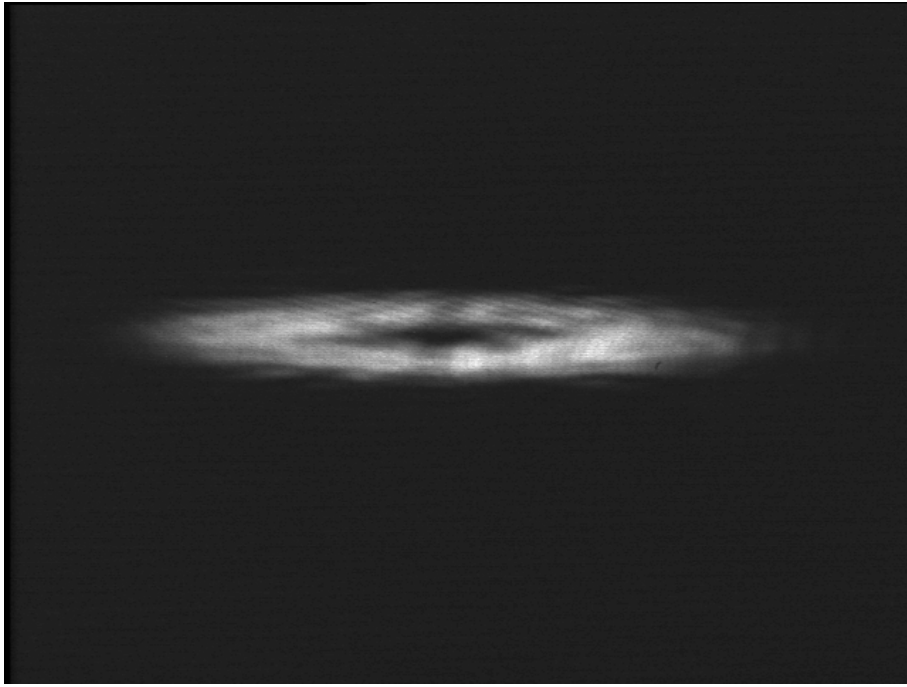


図 8.5: Type 1 の CGH を表示したときの強度分布, 円筒面レンズの焦点距離 10mm 後方

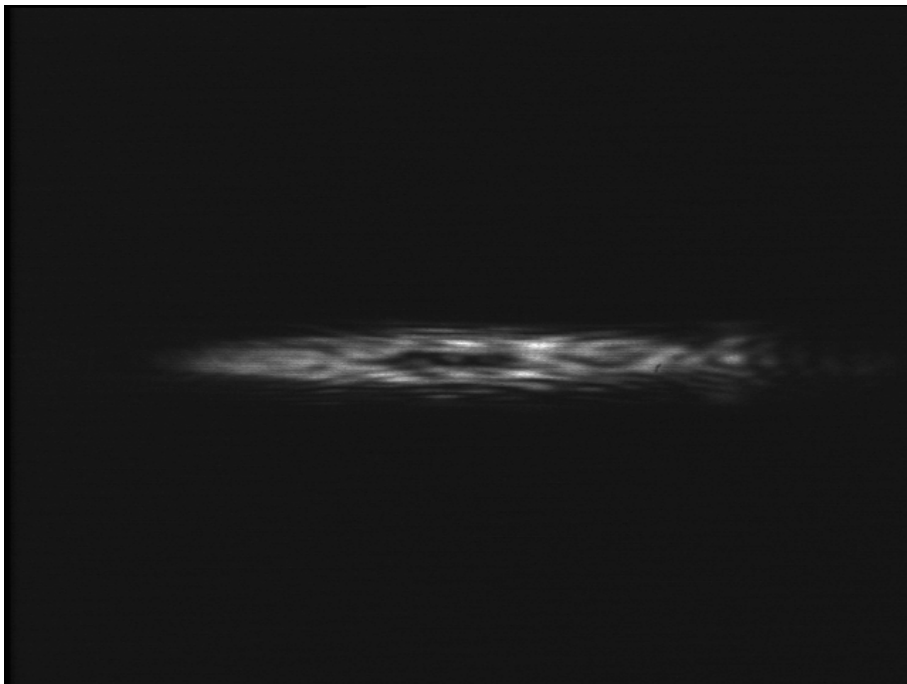


図 8.6: Type 3 の CGH を表示したときの強度分布, 円筒面レンズの焦点距離 10mm 前方

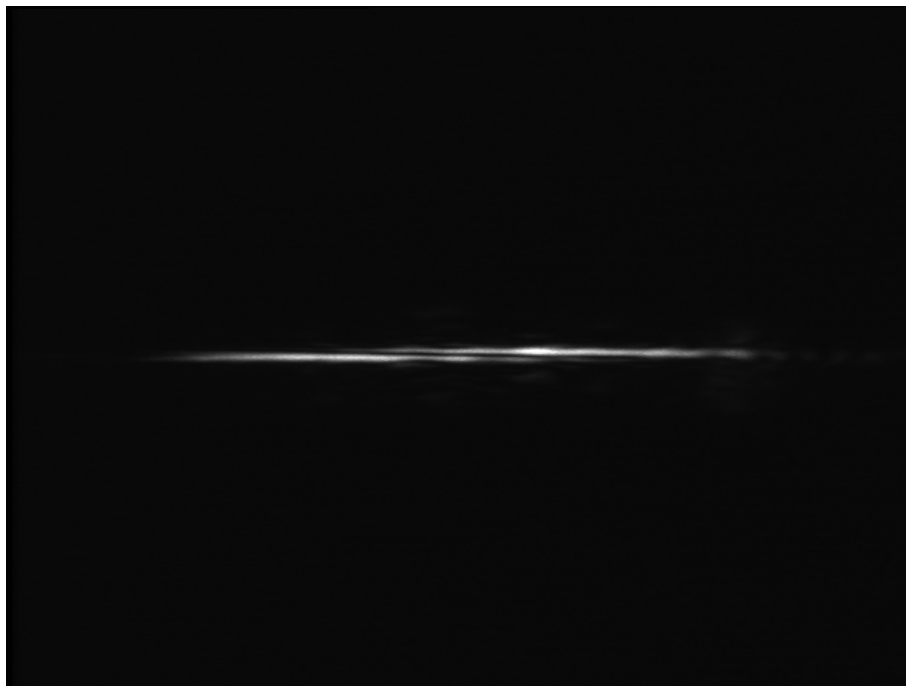


図 8.7: Type 3 の CGH を表示したときの強度分布, 円筒面レンズの焦点距離の位置

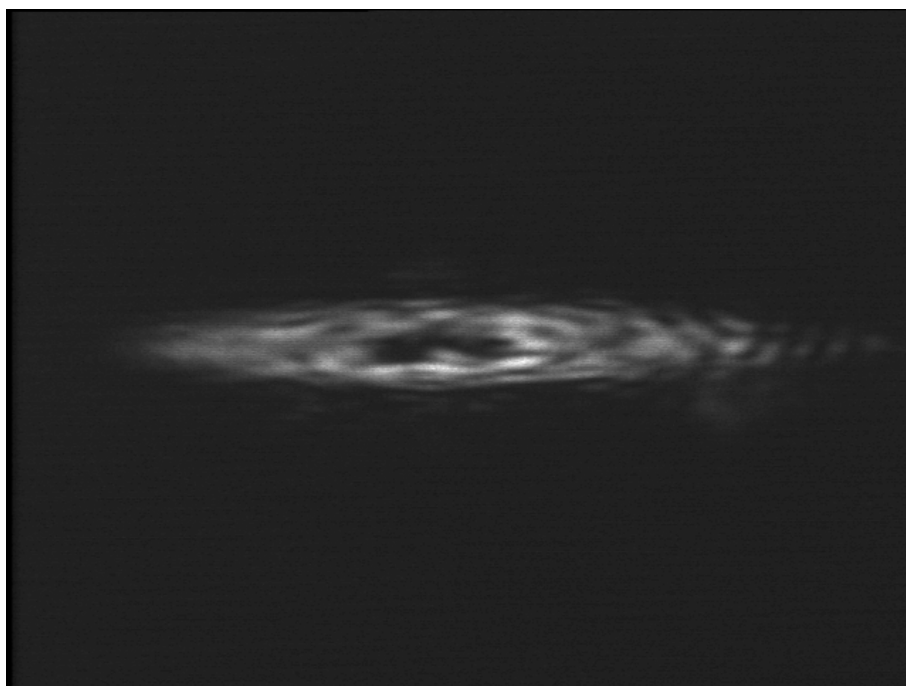


図 8.8: Type 3 の CGH を表示したときの強度分布, 円筒面レンズの焦点距離 10mm 後方

8.2 CGHを用いた非点収差を持つLGビームの生成実験

8.2.1 実験方法

Type 3 形式で非点収差を持つ LG ビームを生成する CGH を用いた実験を行う。以下に CGH 作成に用いたソースコードを示す。

```
function [] = phase()
%warning off all
close all %図の全てを削除
clear all %メモリに格納された変数群の削除
clc

%% Define variables
Lp=2*10^(-5); %pixel pitch
Lambda=240*10^(-6); %hologram pitch
Lx=792; %x resolution
Ly=600; %y resolution
low=0; % amount of phase modulation when luminance = 0
high=186; % amount of phase modulation when luminance = 255
m=1;
B=2*(((Ly/2)-1)*Lp)^2;
brightness=186;
Ry=-800*10^(-3); % astigmatism of y direction
LAMBDA=632.8*10^(-9); % Laser wavelength

%% Create phase pattern
nx=(-Lx/2:1:Lx/2-1)*ones(1,Ly);
ny=(ones(Lx,1)*(-Ly/2:1:Ly/2-1));
x=Lp*nx;
y=Lp*ny;
phase=mod((m*atan2(x,y)-2*pi*x/Lambda)+(pi*y.^2)/(LAMBDA*Ry),2*pi);

%% Create lookup table (lut)
n=1000;
t=linspace(0,1.84*2*pi,n); % to make lookup table
A=0.5819;
Index=besselj(1,t/(2*pi))./A; %diffraction equation
Index(isnan(Index))=0;
a=(sqrt(x.^2+y.^2))/sqrt(B);
a(a>0.999)=0.999;

%% Create phase pattern for effective amplitude
sincInverse=interp1(Index,t/(2*pi),a); % setting of phase modulation width
SLM_phase=(sin(phase)).*sincInverse*brightness/(2*pi);

%% Show images
hiten_image = uint8(SLM_phase); %指定のビット数に変換
imshow(SLM_phase,[low high]); %作成した CGH のプレビュー
imwrite(hiten_image,'Type 3_hiten-800mm.bmp','bmp') %指定の名前とファイル形式で保存
%phase pattern

end
```

Type 3 形式で非点収差を持たない LG ビームを生成する CGH をベースとし、付与する位相因子に (2.27) 式で求めた値を phase に加えている。生成したホログラム画像を図

8.9 に示す。本実験では鉛直 (y) 方向のみに集光し、水平 (x) 方向についてはそのまま伝搬する種類の非点収差をビームに加える。 y 方向の曲率半径を R_y とし、符号と SLM 液晶部の縮小像の倍率 ($\times 1/4$) を考慮して $R_y = -800\text{mm}$ とした。図 8.10 に使用した光学系を示す。光学系は、円筒面レンズと CGH を併用して非点収差を加える方法の際に用いた光学系から円筒面レンズを取り除いたもので、元々の円筒面レンズの焦点距離と同じ位置で y 方向のみに集光するよう R_y の設計を行った。

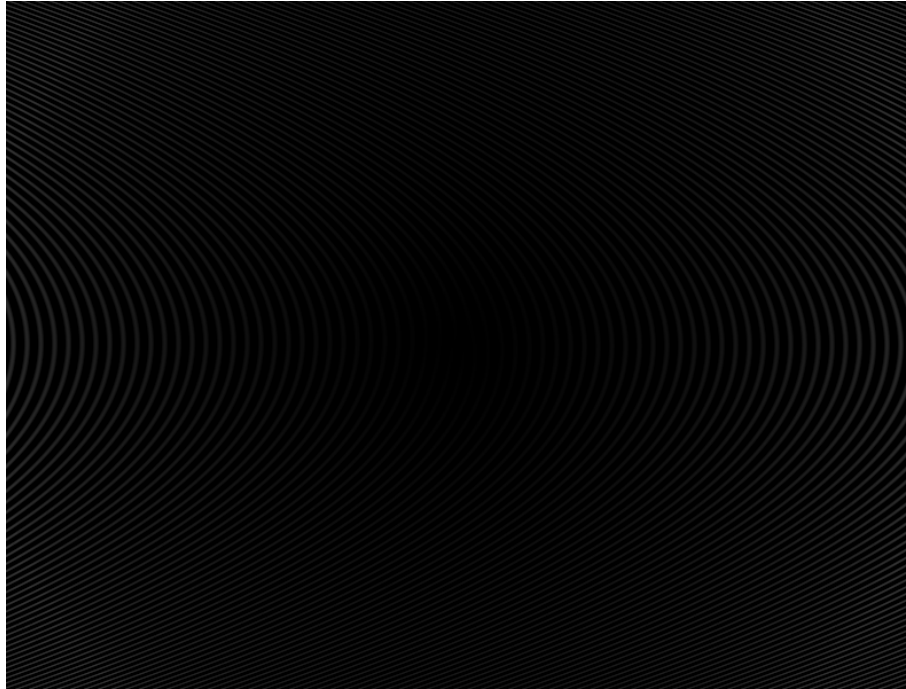


図 8.9: Type 3 形式で非点収差を持つ LG ビームを生成する CGH

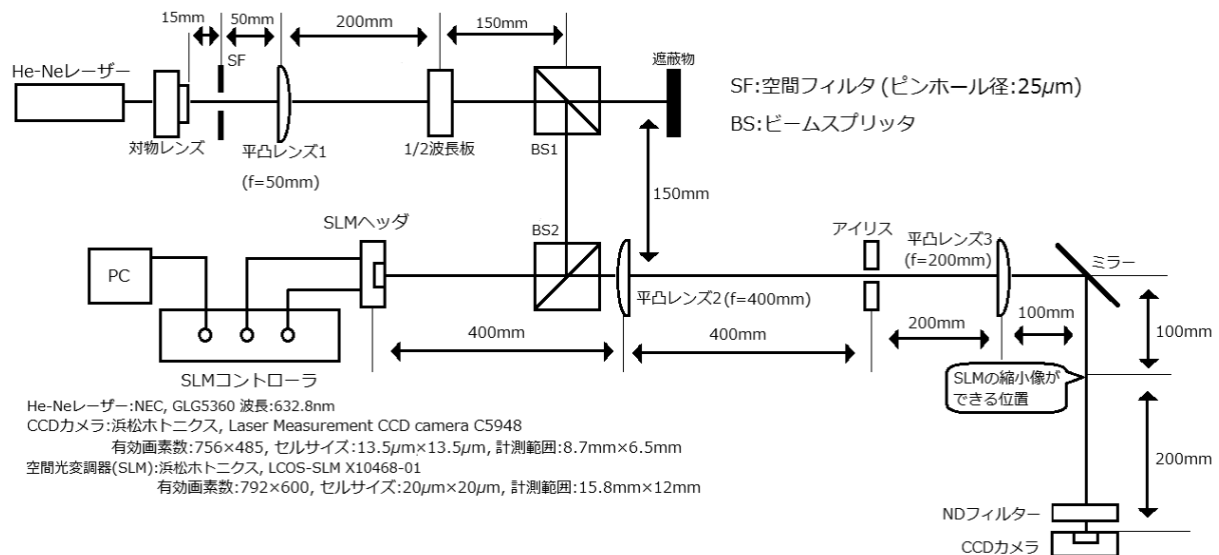


図 8.10: CGH を用いた非点収差を持つ LG ビームの生成に用いた光学系

8.2.2 実験結果

図 8.11 に SLM の縮小像ができる位置での強度分布、図 8.12～図 8.14 に縮小像ができる位置から 195mm～205mm 伝搬後の強度分布を示す。

図 8.11 は Type 3 形式で非点収差を持たない LG ビームを生成した結果の図 7.12 と対応している。SLM 上の縮小像ができる位置では似た分布が得られるはずだが、図 7.12 に比べて図 8.11 ではよりドーナツ状分布のムラが激しい。図 8.12～図 8.14 から、設計通りの位置で y 方向のみに集光するビームが生成できたことがわかる。しかし、集光位置以外では横方向の強度の振動が見られる。

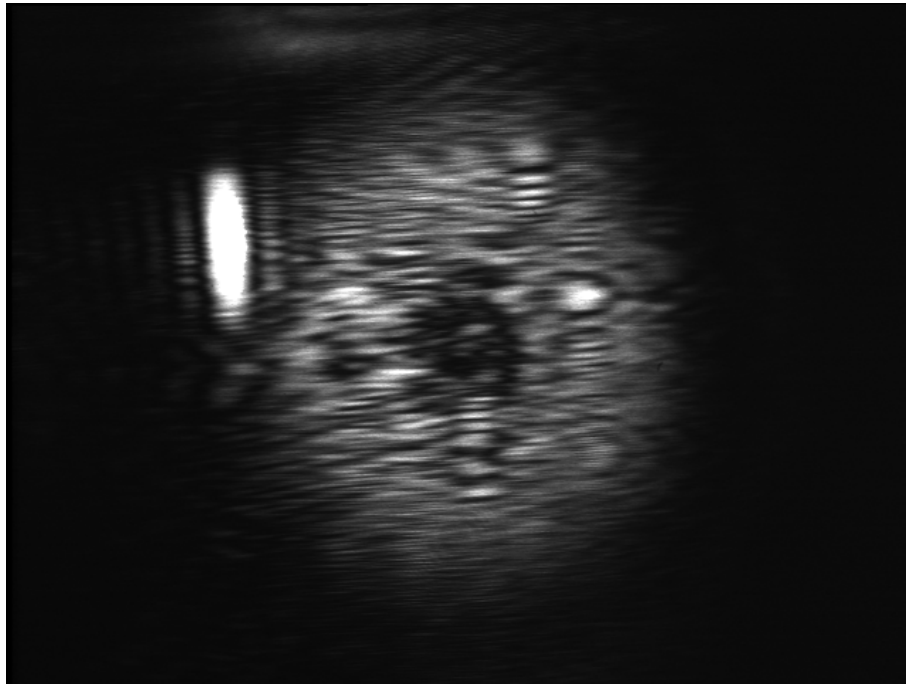


図 8.11: 非点収差を持つ LG ビームを生成する CGH を用いたときの強度分布 (SLM の縮小像ができる位置)

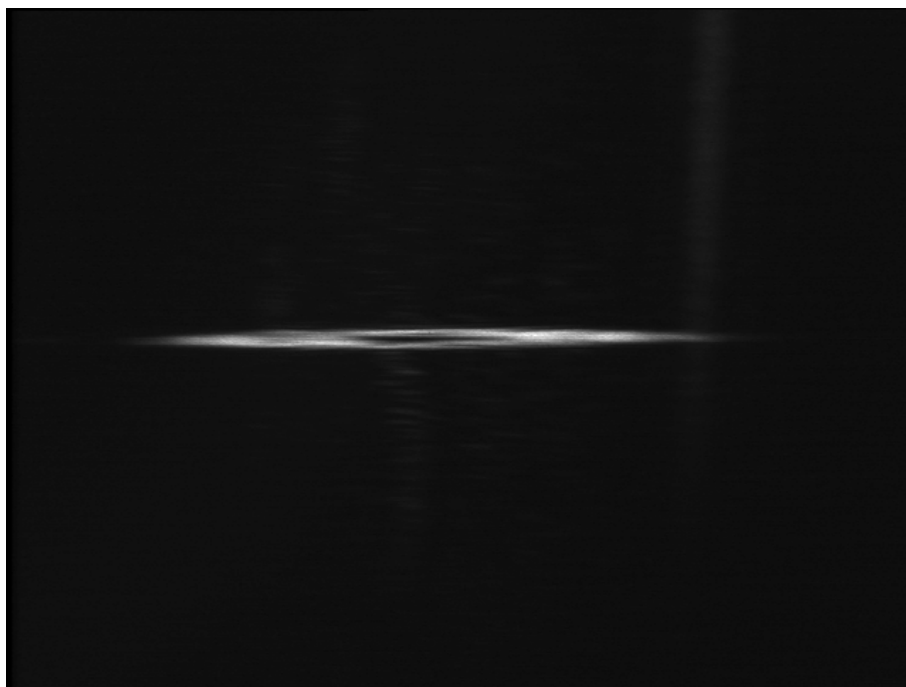


図 8.12: 非点収差を持つ LG ビームを生成する CGH を用いたときの強度分布 (SLM の縮小像ができる位置から 195mm 伝搬後)



図 8.13: 非点収差を持つ LG ビームを生成する CGH を用いたときの強度分布 (SLM の縮小像ができる位置から 200mm 伝搬後)

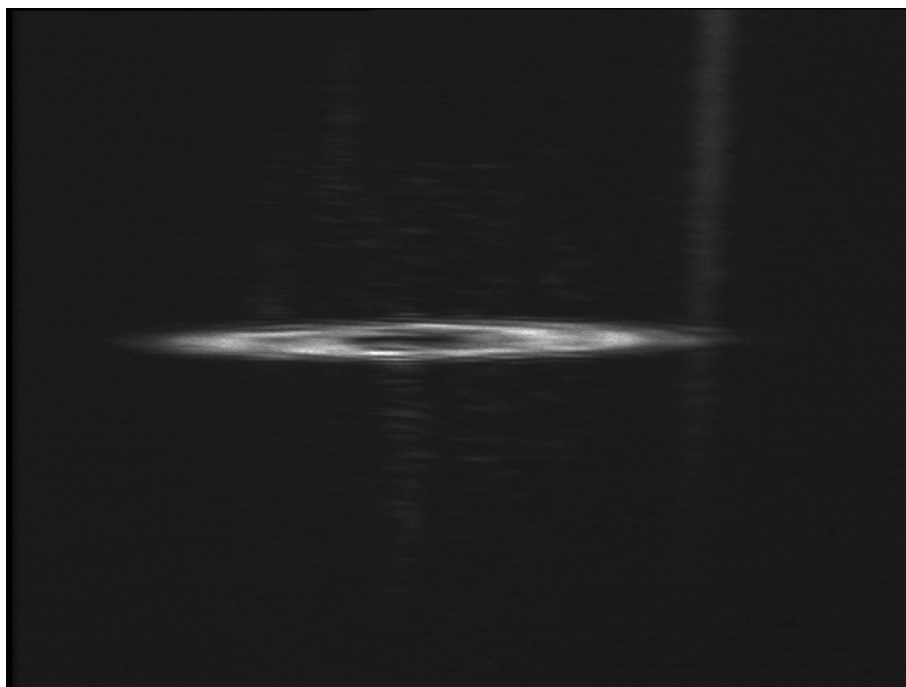


図 8.14: 非点収差を持つ LG ビームを生成する CGH を用いたときの強度分布 (SLM の縮小像ができる位置から 205mm 伝搬後)

8.3 円筒面レンズと CGH を併用した非点収差を持つ LG ビームの生成実験

8.3.1 実験方法

ここまでで述べた 2 つの手法を合わせ、円筒面レンズと CGH を併用してビームに非点収差を加える。円筒面レンズの焦点距離を f_1 、CGH で設定する y 方向の曲率半径 (像ができる位置からの焦点距離) を f_2 とすると、2 つの合成焦点距離 f_3 は

$$\frac{1}{f_3} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (8.1)$$

と表すことができる。本実験では $f_1 = 200\text{mm}$ を固定とし、 $f_2(R_y)$ の設計を変えることで集光位置を制御することができる。

カメラ位置を固定したまま位相特異点の反転現象が起きる位置の前後での強度分布の変化を捉えるには、ビームの集光位置を前後させればよい。実験には図 8.1 と同様の光学系を用いた。円筒面レンズ通過後、焦点距離の近辺で集光位置を制御するために、8.2 章で用いた CGH の R_y の値を変更して複数の CGH を用意した。用意した CGH をソフトウェア LcosControl で切り替えながら、カメラ位置を固定して伝搬中のビームの様子を観察した。使用した CGH の設計を表 8.1 に示す。

表 8.1: 円筒面レンズと CGH を併用して非点収差を加える実験に用いた CGH

	$R_y(\text{mm})$	合成焦点距離 (mm)	円筒面レンズの焦点距離との差分 (mm)
CGH1	-16800	210	-10
CGH2	-32800	205	-5
CGH3	∞	200	0
CGH4	31200	195	5
CGH5	15200	190	10

8.3.2 実験結果

図 8.15～図 8.19 に撮影した強度分布を示す。

図 8.15～図 8.19 から、集光位置が変化して集光前～集光後での強度分布の変化がわかる。しかし、 y 方向のビーム径はカメラを動かして撮影した図 8.6～図 8.8 や図 8.12～図 8.14 と比較すると小さいという結果が得られた。



図 8.15: CGH1 を表示したときの強度分布

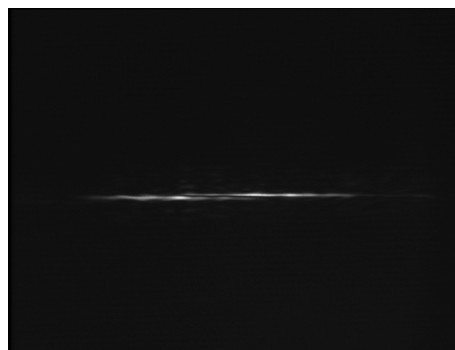


図 8.16: CGH2 を表示したときの強度分布



図 8.17: CGH3 を表示したときの強度分布

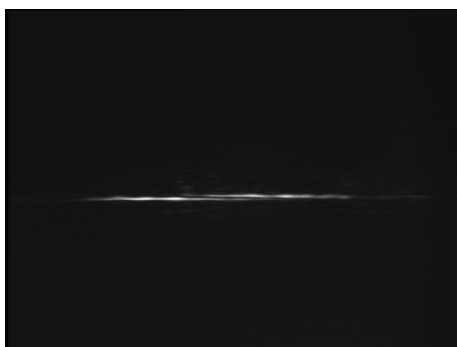


図 8.18: CGH4 を表示したときの強度分布

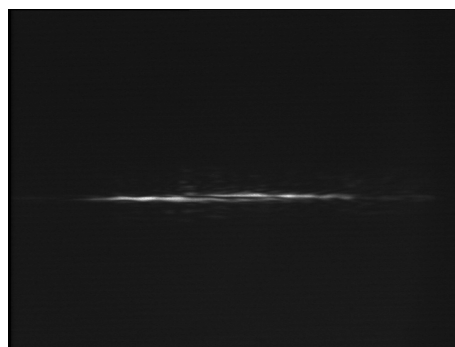


図 8.19: CGH5 を表示したときの強度分布

第9章 結論

本研究の目的は、SLM を用いて非点収差を持つ LG ビームを発生させ、位相特異点の反転の制御を行うことである。その目的を達成するために、使用する SLM の設定、動作確認、表示倍率測定、CGH の設計、作成した CGH を用いたビームの生成実験を行った。

1. SLM と PC の設定を行い、光学系を作成して強度分布の観察を行った。設計値となる元画像と実際に CCD カメラで撮影した強度分布を比較し、似た分布が得られた。このことから、SLM で適切に位相変調を実現できたと判断した。
2. CGH 画像の 1 画素が SLM 液晶部では何画素で表示されているかを求めた。ホログラムピッチの異なる複数の CGH を設計して SLM に表示し、回折光の間隔から実測のホログラムピッチを計算した。想定と実測のピッチの間の比例係数を求め、本研究の設定条件の下では CGH 画像の 1 ピクセルが SLM では 0.97 ± 0.05 ピクセルで表示されることが分かった。表示倍率が丁度 1 倍ではない場合、想定と実測のホログラムピッチの間にずれが生じ、CGH を用いた全ての実験に影響が及ぶこととなる。
3. 位相特異点を持たない回折格子を SLM に表示して強度分布の観察を行った。フーリエ面において、回折光の横方向に回折格子の空間周波数成分とその高調波が確認できた。この影響を後の実験の際にも考慮した。
4. LG ビームを生成する CGH を SLM に表示して強度分布の観察を行った。中心に穴の開いた強度分布を持つ LG ビームの特徴を示すビームを生成した。
5. 非点収差を持つ LG ビームを発生させる複数の方法について実験を行った。円筒面レンズを用いる方法、CGH で非点収差を加える方法、円筒面レンズと CGH を併用して非点収差を加える方法それぞれで位相特異点の反転が起きる前後の強度分布の観察を行った。3 種類の方法における y 方向のビーム径が異なる原因の調査、生成したビーム断面内の想定外の強度変調の除去が必要である。

参考文献

- [1] 伊波 雅生, 「光ビームの軌道角運動量密度分布の測定」 電気通信大学修士論文, (2020).
- [2] Victor Arrizón, Ulises Ruiz, Rosibel Carrada, and Luis A. González, "Pixelated phase computer holograms for the accurate encoding of scalar complex fields" J. Opt. Soc. Am. A **24**, 3500 (2007).
- [3] 北谷 拓磨, 「空間光変調器を用いた擬似振幅変調ホログラムによる光の空間モード変換」 電気通信大学修士論文, (2017).
- [4] 和田 篤, 「位相特異点を持つ光ビームの発生と伝搬に関する研究」 電気通信大学博士論文, (2006).
- [5] Atsushi Wada, Takumi Ohtani, Yoko Miyamoto and Mitsuo Takeda, "Propagation analysis of the Laguerre-Gaussian beam with astigmatism" J. Opt. Soc. Am. A **22** (2005) 2746
- [6] Yoko Miyamoto, Atsushi Wada, Takashi Yonemura and Mitsuo Takeda, "Detailed measurement of the phase distribution of an optical beam with inverting vortex" J. Opt. **15** (2013) 044002
- [7] Naoya Matsumoto, Taro Ando, Takashi Inoue, Yoshiyuki Ohtake, Norihiro Fukuchi, and Tsutomu Hara, "Generation of high-quality higher-order Laguerre-Gaussian beams using liquid-crystal-on-silicon spatial light modulators", J. Opt. Soc. Am. A **25**, 1642 (2008).
- [8] 宮城 勇雅, 「空間光変調器を用いた疑似振幅変調ホログラムの研究」 電気通信大学卒業論文, (2018).
- [9] 宮本 洋子・和田 篤, 「ラゲール・ガウスビームの発生と検出」 光学 **35**(12), 618-624, (2006).
- [10] 吉村 武晃, 「光情報工学の基礎」 コロナ社, (2000).
- [11] Joseph W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics", 3rd ed., Roberts & Company Publishers, (2016).
- [12] LCOS-SLM X10468-01 シリーズ データシート, 浜松ホトニクス, (2018).

- [13] LCOS-SLM 制御ソフトウェア 取扱説明書, 浜松ホトニクス.
- [14] ガスレーザ総合カタログ Vol.3, 昭和オプトロニクス.

謝辞

本研究を行うにあたり、学部生時代から3年間丁寧にご指導して下さいました宮本洋子教授に深く感謝いたします。研究内容に関する知識や物事に対する基礎的な考え方など、多くの助言を頂きました。

また、渡邊恵理子准教授をはじめ渡邊研究室の皆さんには修士輪講で大変お世話になりました。感謝いたします。

そして、研究室での活動全般において大変お世話になった、宮本研究室の先輩である早瀬茂法さん、福原美穂さん、伊波雅生さん、澤優摩さん、水野宏紀さん、同期の落合洋介さん、渡辺大貴さん、後輩の神田涼吾さん、新田虎太郎さん、楊安東さん、熊野翔さん、小原颯平さん、関奏太さんに感謝いたします。

最後に、ここまでの生活を支えてくださった友人、家族に感謝いたします。